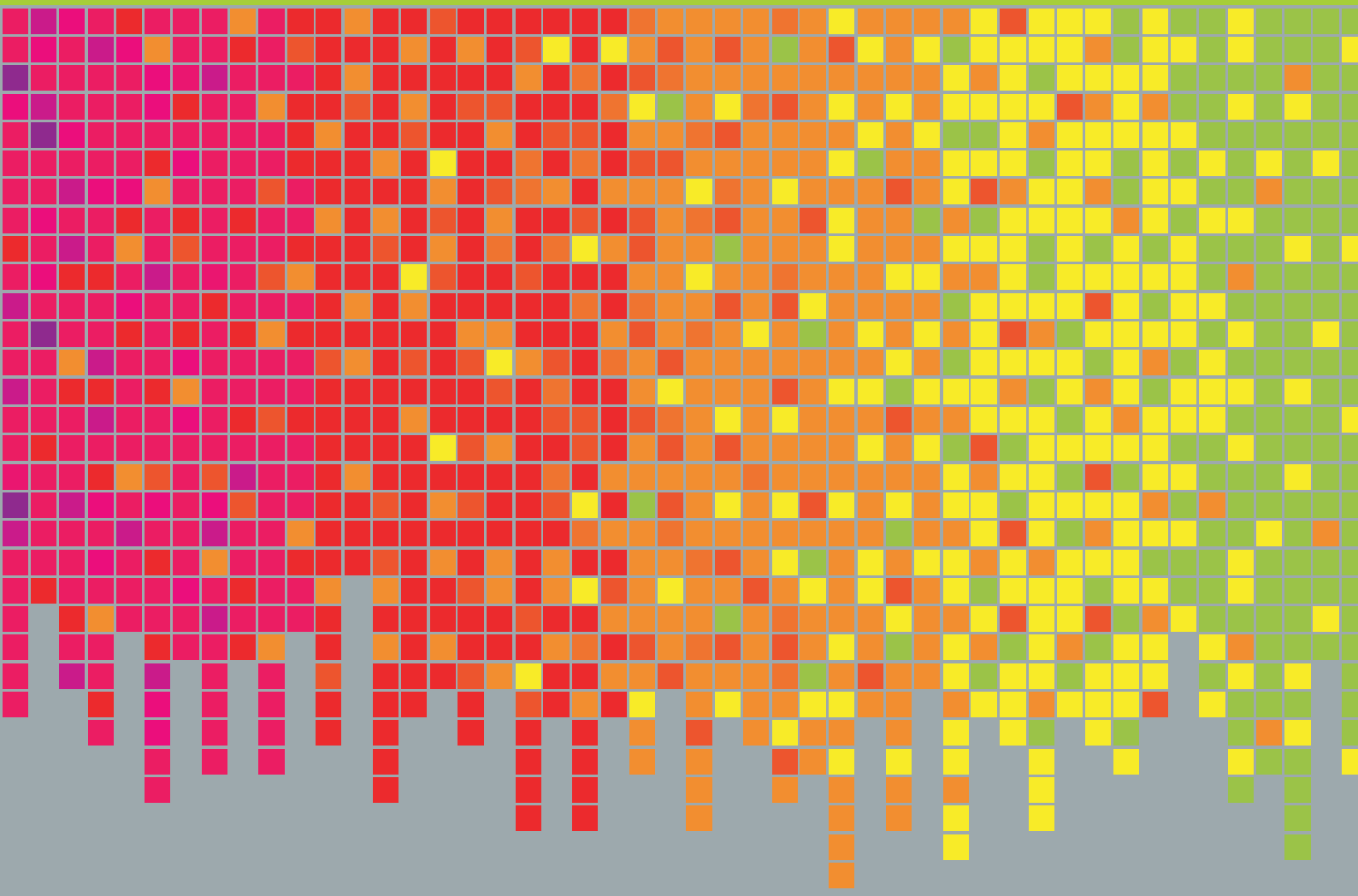
Fraunhofer
IFF

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR FABRIKBETRIEB UND -AUTOMATISIERUNG IFF, MAGDEBURG

13./14. FORSCHUNGSKOLLOQUIUM AM FRAUNHOFER IFF 2012



13./14. Forschungskolloquium am Fraunhofer IFF

FORSCHUNG VERNETZEN – INNOVATION BESCHLEUNIGEN

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr. h. c. mult. Michael Schenk

In Kooperation mit:

OTTO VON GUERICKE UNIVERSITÄT MAGDEBURG

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort Seite 7
Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr. h. c. mult. Michael Schenk,
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF

Augmented Reality System für interaktive Produktpräsentationen Seite 9
Dipl.-Inf. Alexa Kernchen, Simon Adler, M.Sc., Dr.-Ing. Rüdiger Mecke
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Virtual Engineering

Probenanalysesystem einer Wirbelschichtversuchsanlage zur Untersuchung des Feststoffumsatzes von Biomassen Seite 19
Dipl.-Ing. Franka Kretschmer, Johannes Haus, Dr. Eyck Schotte, Prof. Dr. Evangelos Tsotsas,
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Verfahrenstechnik

Emissionszertifikatehandel im Straßengüterverkehr Seite 27
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Alexander Kaiser
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Logistik und Materialflusstechnik

SardaS – Simulink Framework für die Entwicklung von intelligenten Sensoren Seite 37
Dipl.-Inf. Tino Brade, Dr. Sebastian Zug, Prof. Jörg Kaiser
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Verteilte Systeme

Transfer von Erfahrungswissen in der Instandhaltung – zur Förderung der Problemlösefähigkeit technischer Experten Seite 45
Dipl.-Päd. Wilhelm Termath
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Berufs- und Betriebspädagogik

Effiziente Erstellung einer interaktiven Komponentendarstellung Seite 53
Dipl.-Ing. Tina Haase, Dipl.-Ing. Marc Winter
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Virtuell Interaktives Training

Investigation of lotion distribution in wet wipes by pore network model and X-ray micro tomography Seite 61
Yu Sun, M.Sc., Dr. Jörg Müller, Dr. Thomas Metzger, Prof. Dr. Evangelos Tsotsas
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Verfahrenstechnik

Methode zur Modellierung und Analyse von logistischen Daten für das echtzeitnahe Monitoring eines Logistiksystems Seite 69
Dipl.-Math. Annegret Brandau
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Logistik und Materialflusstechnik

Mobilitätsanalyse von Elektrofahrzeugen als Grundlage für Mobilitätsprognosen Seite 77
Dipl.-Inf. Tobias Kutzler, Dipl.-Inf. Steve Schneider
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Logistik- und Fabriksysteme

Digital Engineering in KMU – Planungsprozesse bedarfsgerecht technologiebasiert unterstützen Seite 87
Dipl.-Ing. Stefan Leye
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Virtuell Interaktives Training

Sicherung einer zukunftsträchtigen Verkehrsinfrastruktur für den Logistikstandort Deutschland Seite 95
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Fabian Behrendt
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Logistik und Materialflusstechnik

Kompakter, multifunktionaler Sensor auf Basis von Tiefenbildtechnologie für die Schüttguttechnik Seite 105
Dipl.-Ing. Liu Cao
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Materialflusstechnik und -systeme

Höhere Leistungsfähigkeit von Laborzentrifugen durch Rotoren aus Kohlefaserwerkstoffen Seite 113
Pierre Möllers, M.Sc.
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Virtual Engineering

Plattformentwicklung zur automatisierten Mikroskopbildaufnahme, Bildsegmentierung und -analyse unter den Gesichtspunkten Effizienz und Nachhaltigkeit Seite 121
Tobias Baum
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Biosystems Engineering

Entwicklung eines innovativen Prototyps zur Umwandlung von Biogas und Bioethanol in Wasserstoff Seite 127
Dipl.-Ing. Torsten Birth
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Prozess- und Anlagentechnik

Integration komplexer dynamischer Systeme in Augmented Reality-Anwendungen im Fabriklebenszyklus und in der Fabrikplanung Seite 141
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Andreas Hoffmeyer
Volkswagen AG, Wolfsburg

Autorenverzeichnis Seite 153

Impressum Seite 155

VORWORT

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Michael Schenk, Institutsleiter des Fraunhofer-Instituts für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF Foto: Dirk Mahler

Liebe Nachwuchswissenschaftler, liebe Kolleginnen und Kollegen,

Forschen ist unsere Berufung. Als Wissenschaftler erfolgreich zu sein, verlangt jedoch mehr, als sich ins Labor, in die Bibliothek oder an den Rechner zurückziehen und im »stillen Kämmerlein« Wissensdurst und Forscherdrang nachzugeben.

Will man die Zukunft mit neuen Erkenntnissen und Entwicklungen verändern, muss man sie seiner Fach-Community und früher oder später auch einer größeren Öffentlichkeit mitteilen.

Doch Präsentieren und Publizieren will gelernt sein. Wer nicht sicher auftritt und professionell nach den Regeln guter wissenschaftlicher Praxis in Wort und Schrift publiziert, läuft Gefahr, nicht gehört zu werden. Selbst wenn der wissenschaftliche Gehalt bemerkenswert ist.

Diskussionen unter Experten, gern mal kontrovers ausgetragen, im kleinen Kreise oder auf Tagungen und Kongressen gehören zu unserem Alltag. Die Promotionsschrift und ihre Verteidigung sind dagegen Meilensteine im Leben jedes Wissenschaftlers und fordern alle Kräfte und alles Wissen.

Mit dem IFF-Kolloquium wollen wir unsere jungen Talente für diese Momente in ihrer Karriere vorbereiten. Es bietet die Möglichkeit zum Austausch unter Experten, schult im Präsentieren und leitet durch den Publikationsprozess.

Für dieses Mal haben Sie es geschafft – Sie halten nun Ihre Publikation in den Händen, haben neue praktische Erfahrungen gesammelt und können darauf aufbauen. Arbeiten Sie an ihrem Thema und bringen Sie es weiter voran – es könnte der Anfang einer großen und neuen Entwicklung sein.
Carpe diem!

Ihr

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr. h. c. mult. Michael Schenk

AUGMENTED REALITY SYSTEM FÜR INTERAKTIVE PRODUKTPRÄSENTATIONEN

Dipl.-Inf. Alexa Kernchen
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Virtual Engineering

Simon Adler, M.Sc.
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Virtual Engineering

Dr.-Ing. Rüdiger Mecke
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Virtual Engineering

AUGMENTED REALITY SYSTEM FÜR INTERAKTIVE PRODUKTPRÄSENTATIONEN

Dipl.-Inf. Alexa Kernchen, Simon Adler, M.Sc., Dr.-Ing. Rüdiger Mecke, Virtual Engineering,
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF

1 Abstract

Diese Arbeit stellt ein Augmented-Reality-System für den Einsatz bei Produktpräsentationen im Bereich Marketing vor. Das stationäre System ermöglicht die lagesynchrone Überlagerung planarer Objekte in Live-Videosequenzen mit produktrelevanten Informationen. Hierzu wurde ein robustes und performantes Trackingverfahren zum Erfassen von planaren, texturierten Objekten entwickelt, das keine zusätzlichen Marker erfordert. Weiterhin wird ein Ansatz zur interaktiven Nutzerinteraktion vorgestellt, bei dem das System über vorab definierte Interaktionsflächen auf dem realen Objekt bedient werden kann. Das entwickelte System wurde evaluiert und im Rahmen verschiedener Anwendungen eingesetzt.

2 Motivation

Die Augmented Reality (AR) ermöglicht die Überlagerung von virtuellen 3-D-Modellen auf reale Objekte in einem Kamerabild. Durch AR können Printmedien bei Produktpräsentationen im Marketing durch dreidimensionale dynamische Inhalte erweitert werden. Ein möglicher Einsatz ist die Präsentation auf einem Messestand, um komplexe Produkte und ihre Funktionsweise für potentielle Kunden erlebbar zu machen. Mit Hilfe der AR können die 3-D-Modelle auf intuitive Art und Weise in die Hand des Kunden gelegt werden, sodass dieser durch Bewegen des realen Objekten das überlagerte virtuelle Objekt synchron bewegen und explorieren kann.

Es wurden erste Systeme präsentiert, die mittels AR das Produktmarketing unterstützen[1]. Der Kunde kann sich damit an einem Kiosksystem im Ladengeschäft auf der Verpackung das enthaltene Produkt darstellen lassen. Die Firma Boss zeigte ein System, bei dem die Kunden an einem Schaufenster[2] spezielle Karten in eine Kamera halten und denen dann Videos dargestellt werden. Neben solchen Standsystemen gibt es bereits verschiedenen Web-Anwendungen. Diese reichen von einfachen Augmentierungen auf Produkten bis hin zur Darstellung von Kleidungen und Accessoire direkt auf dem Anwender[3]. Die für die Überlagerung notwendige Technologie zur Bestimmung der Position und Lage der zu augmentierenden Objekte ist das bildbasierte Tracking. Im Rahmen dieses Beitrags wird hierauf näher eingegangen und ein Ansatz zur Verbesserung der Robustheit für den genannten Anwendungskontext vorgestellt. Um mehr als nur das Bewegen des augmentierten Objektes zu ermöglichen, ist für viele Anwendungen eine Steuerung von dynamischen Inhalten (z.B. Funktionsweisen, Montagereihenfolgen) wünschenswert. Diese Interaktionen sollten möglichst einfach und intuitiv sein und ohne zusätzliche Bedienhardware (z.B. Tastatur und Maus) auskommen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden einfache Interaktionstechniken untersucht, die eine Interaktion direkt auf dem realen Objekt ermöglichen.

1 http://www.metaio.com/projects/kiosk/lego/ - Version: 02.04.2012 14:00 Uhr

2 http://blog.t-immersion.com/tag/hugo-boss/ - Version: 02.04.2012 14:05 Uhr

3 http://blog.t-immersion.com/tag/face-tracking/ - Version 03.04.2012 14:15 Uhr

3 Bildbasiertes Tracking

Für die Überlagerung der virtuellen Modelle muss die Position und Orientierung (Pose) des realen Objektes im dreidimensionalen Raum erfasst werden (Tracking). Hierzu müssen, bei der Nutzung von nur einer Kamera, Merkmale auf dem realen Objekt im Kamerabild in Relation zu einem Modell des realen Objektes gesetzt werden. Diese im Idealfall übereinstimmenden Merkmale werden als Korrespondenzen bezeichnet. Mit hinreichender Anzahl von Korrespondenzen kann das folgende Gleichungssystem gelöst werden, das die Abbildung eines Raumpunktes A des Objektmodells auf Koordinaten a in der Kamerabildebene beschreibt:

$$a = CRA + T$$

Die Kameramatrix C enthält die intrinsischen Parameter (u.a. effektive Brennweite und Bildhauptpunkt) der realen Kamera. Der Vektor T beschreibt die Position des Kamerakoordinatensystems und die Rotationsmatrix R dessen Lage im Raum. Die Parameter der realen Kamera werden auf eine virtuelle Kamera übertragen, mit der die Visualisierung der zu überlagernden Modelle erfolgt. Das Gleichungssystem kann beispielsweise mittels einem numerischen Optimierungsalgorithmus (Levenberg-Marquardt-Algorithmus [1]) gelöst werden. Hierzu werden mindestens vier Korrespondenzen benötigt.

In bisherigen Anwendungen der AR lag der Fokus bei den bildbasierten Trackingverfahren primär auf der Nutzung so genannter schwarz-weiß Marker [2]. Diese zeichnen sich durch eine klare geometrische Form aus, die das Detektieren in einem Kamerabild erleichtert. Marker besitzen vor allem im Marketing den negativen Designaspekt, dass sie zusätzlich an das Objekt angebracht werden müssen. Weiterhin nehmen diese Marker wertvollen

Platz auf einem Werbeträger ein. Daher ist es wünschenswert, ein Tracking basierend auf vorhandenen Informationen und Merkmalen zu ermöglichen. In diesem Kontext gibt es bereits Ansätze und Untersuchungen [3] [4] [5] [6] [7]. Der Unterschied der Verfahren liegt vor allem in der Wahl der Merkmale und deren Komplexität. So werden in Arbeiten wie [8] Merkmalsbeschreibungen genutzt, die Invarianzen bezüglich Rotation, Skalierungen und Lichtveränderungen beinhalten. Ein solches Merkmal kann somit unabhängig von diesen Einflüssen im Kamerabild wiedergefunden werden. Allerdings bedarf es hierzu einem hohen Rechenaufwand.

Dem gegenüber stehen Verfahren mit Merkmalsbeschreibungen ohne diese Invarianzen. Meist werden die um den Merkmalspunkt liegenden Helligkeitswerte der Pixel gespeichert [9] [6]. Um eine Zuordnung zu ermöglichen, werden viele Merkmale gesammelt. Durch verschiedene Verifizierungsverfahren können aus der größeren Menge die korrekten Korrespondenzen bestimmt werden. Der Trackingansatz von Taylor et al. [9] nutzt solche einfachen Beschreibungen von Merkmalen. Mit dem vorgestellten Tracking ist ein robustes und schnelles Tracking möglich. Letzteres ist in dem vorliegenden Beitrag vor allem von Bedeutung, da zusätzlich zu dem Tracking auch Interaktionskomponenten hinzugefügt werden, welche ebenfalls Rechenzeit benötigen. Daher wurde als Grundlage für das Tracking die Arbeiten [9] [6] verwendet und anwendungsbezogen erweitert.

4 Merkmalsbasiertes Tracking

In dieser Arbeit wird ein merkmalsbasierter Trackingansatz für beliebige, texturierte und planare Objekte (Poster) untersucht. Für die initiale Detektion sowie das Tracking von Bildmerkmalen kommt das Verfahren nach [9] zur Anwendung. Eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass im vorliegenden Anwendungskontext Verbesserung der Stabilität und Robustheit notwendig sind. Um dies zu erreichen, wurden Verfahren der Bewegungsanalyse einbezogen, die eine robuste Verfolgung der Objektpose ermöglichen.

Die Verarbeitungskette ist folgendermaßen aufgebaut: Zunächst wird das Videobild von der Kamera erfasst. Das Bild wird dem Tracking-Modul übergeben, das als Ergebnis die 3-D-Pose des betrachteten Objektes ausgibt. Diese wird gemeinsam mit den zu überlagernden virtuellen Informationen an das Visualisierungsmodul weitergereicht, welches die Informationen lagerichtig auf dem erfassten Kamerabild eingeblendet.

Das Tracking beinhaltet mehrere Submodule. Für eine erstmalige Detektion wird ein Abgleich zwischen Merkmalen im aktuellen Kamerabild und Merkmalen in einer zuvor angelernten Datenbank durchgeführt. Bei einer erfolgreichen Detektion wird im nächsten Bild anstatt der erneuten initialen Detektion eine Verfolgung mittels Verfahren der Bewegungsanalyse (optischer Flusses [10]) durchgeführt. Eine genauere Beschreibung beider Submodule wird in den folgenden Abschnitten 4.1 und 4.2 gegeben.

4.1 Initiale Detektion

Für die initiale Detektion werden die Merkmale des Posters in einer separaten Offlinephase aus verschiedenen Kameraperspektiven ("Sichten") angelernt und in einer Datenbank gespeichert. Zur Laufzeit werden Merkmale im aktuellen Kamerabild mit den Merkmalen in der Datenbank verglichen (Matching). Stimmen die Merkmale der aktuellen Kamerasicht mit den Merkmalen einer angelernten Sicht überein, kann die Pose des Posters im Kamerabild bestimmt werden.

4.1.1 Anlernen des Posters

Um ein bestimmtes Poster detektieren und verfolgen zu können, muss dieses zunächst dem System bekannt gemacht werden. Hierzu werden aus mehreren markanten Punkten auf dem Poster Modelle erstellt. Dieser Vorgang geschieht in einer separaten Offlinephase. Die Punktmerkmale sollten sich durch eine hohe Reproduzierbarkeit, Unterscheidbarkeit und eine effiziente Berechnung auszeichnen. Um ein Merkmal zu bestimmen, muss dieses zunächst im Bild detektiert werden. Für die Detektion der Merkmale wird der FAST-9-Detektor (Features from Accelerated Segment Test) verwendet [11]. Dieser weist eine gute Reproduzierbarkeit bei kleinen Sichtveränderungen auf und ist effizient zu berechnen. Im Gegensatz zu Detektoren wie SIFT [8] ("Scale Invariant Feature Transform") und GLOH [12] ("Gradient Location and Orientation Histogram") werden für die Detektion keine Ableitungsoperationen oder aufwendige Suchen in verschiedenen Auflösungsstufen durchgeführt.

Der FAST-Detektor berechnet für jeden Bildpunkt den Helligkeitsunterschied zu den umliegenden auf einem Kreis angeordneten Pixeln. Ein Punkt wird als Merkmal klassifiziert, wenn für eine bestimmte Anzahl von umliegenden Pixeln der Schwellenwert t_{FAST} überschritten wird. Nachdem die Positionen der Merkmale gefunden wurden, müssen diese für den späteren Matching-Vorgang beschrieben (extrahiert) werden. Die Definition für die Merkmalsbeschreibung wird als Deskriptor bezeichnet. Der in dieser Arbeit genutzte Deskriptor basiert auf den Helligkeitswerten um den aktuellen Merkmalspunkt. Die Beschreibung beinhaltet keine Invarianz gegenüber Veränderungen der Lage des Posters im Raum. Um dies zu kompensieren, wird pro Merkmal ein Modell der möglichen Merkmalsausprägungen erstellt und in der Modelldatenbank M_P für das Poster abgelegt.

Um verschiedene Sichten auf das Merkmal zu erhalten, werden mittels einer virtuellen Kamera Bilder des Posters aus verschiedenen Kameraperspektiven generiert. Es werden hierbei Bilder aus verschiedenen Entfernungen erstellt. Für jede Entfernung wird die Kamera mehrmals um die Sichtachse rotiert. Für jede dieser Kameraposen (Entfernung, Rotation um Sichtachse) werden Modelle für die Merkmale angelegt. Ein Modell eines Merkmals ergibt sich aus mehreren statistischen Häufigkeiten der Helligkeitswerte (Histogramm) in der Umgebung des Merkmals.

Für die Erstellung der Histogramme erfolgen, ausgehend von der jeweiligen Kamerapose, weitere Rotationen um die beiden Achsen senkrecht zur Sichtachse. Es werden hierbei Rotationen bis zu +/-30 Grad mit einer Schrittweite von einem Grad ausgeführt. Für jede Ansicht werden einzelne Bilder generiert, in denen mittels des FAST-Detektors die Positionen von Untermerkmalen extrahiert werden. Ein Untermerkmal wird mit 8x8 Helligkeitswerten in einem 15x15 großen Bereich um den Merkmalspunkt beschrieben (siehe Abbildung 1). Die Werte werden für eine Invarianz gegenüber variierenden Beleuchtungsverhältnissen standardisiert.

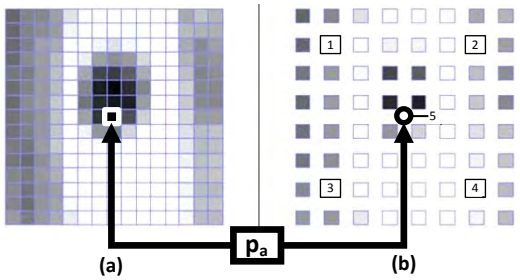


Abbildung 1: Untermerkmale werden nach [9] in einem Gitter von 15x15 Pixeln um den Merkmalspunkt p_a extrahiert. (a) 15x15 Bereich um p_a. (b) 64 betrachtete Pixel mit einem Abstand von zwei Pixeln. Die nummerierten Pixel werden für den 5-Bit Index verwendet (siehe Abschnitt 4.1.2.2)

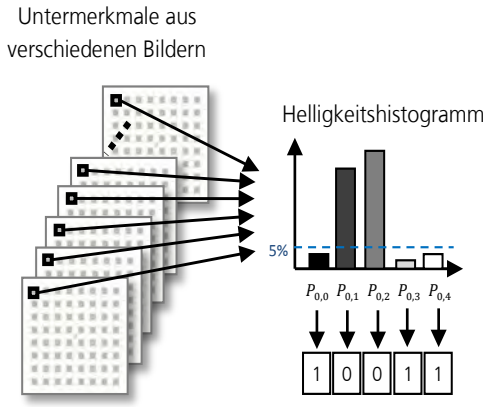


Abbildung 2: Schema zur Erstellung eines HIP-Merkmalsvektors. Die Helligkeitswerte der Pixel in dem Untermerkmal werden in ein 5-stufiges Histogramm eingetragen. Dieses wird binär quantisiert, indem die seltenen Helligkeitsbereiche maskiert werden

Da die vom FAST-Detektor bestimmten Merkmalspositionen nicht aus allen Sichten auf das Poster wiedergefunden werden, ist es wichtig, nur solche Modelle für Merkmale der Posterdatenbank hinzuzufügen, welche invariant gegenüber Sichtveränderungen sind. Daher werden die extrahierten Untermerkmale ihrer Position im Ausgangsposter zugeordnet. Nachdem für alle Bilder die Untermerkmale extrahiert wurden, werden die größten Cluster im Ausgangsposter zu einem Modell, dem "Histogrammed Intensity Patch" (HIP), zusammengefasst.

Es werden hierzu die Helligkeitswerte der Pixel in dem extrahierten Feld jeweils in ein 5-stufiges eingetragen (siehe Abbildung 2). Für eine effiziente Abspeicherung wird das Histogramm binär quantisiert. Hierzu werden selten aufgetretene Helligkeitswerte, (Histogrammbereich mit einer Wahrscheinlichkeit unter 5%) maskiert. Der sich ergebene HIP-Merkmalsvektor P hat lediglich $5x64$ Bits Speicherbedarf. Das Erstellen der HIPs aus den Untermerkmalen wird solange durchgeführt, bis eine definierte Anzahl an HIPs (n_{HIP}) pro Poster extrahiert wurden oder mindestens 50% aller extrahierten Untermerkmale in die Datenbank aufgenommen wurden [9].

4.1.2 Tracking des Posters

4.1.2.1 Ermittlung der Bildmerkmale

In der Onlinephase wird für das jeweils aktuelle Kamerabild eine Merkmalsmenge M_K erstellt. Die Merkmale werden wie in der Anlernphase mit dem FAST-Detektor lokalisiert. Da das Poster im Kamerabild nur einen Teil ausfüllt, können gefundene Merkmalspositionen auch außerhalb des Posters. Ebenfalls kann sich durch Beleuchtungsänderungen die Anzahl der gefunden Merkmale verringern bzw. erhöhen. Als Folge werden nicht immer genügend Merkmale für einen zuverlässigen Abgleich mit der Posterdatenbank M_P gefunden. Dies wird mit Anpassen des Schwellenwertes t_{FAST} des FAST-Detektors kompensiert. Zu viele Merkmale können zu einem erhöhten Rechenzeitbedarf bei dem Matching führen. Somit stabilisiert ein adaptiver Schwellenwert ebenfalls die Rechenzeit.

Die Beschreibung der Onlinemerkmale R ist denen der Untermerkmale aus der Anlernphase (siehe Abschnitt 4.1.1) sehr ähnlich. Es werden ebenfalls standardisierte $8x8$ Helligkeitswerte mit einem Abstand von zwei Pixeln um den Merkmalspunkt extrahiert (siehe Abbildung 1). Die Intensitäten werden in fünf Intervalle unterteilt und mit einem 5-Bit Wert dargestellt. Tritt ein Helligkeitswert in einem Intervall auf, wird dieses mit einer Eins maskiert. Die entstehenden 5-Bit Werte werden für ein HIP zu einem $5x64$ Bit Merkmal K zusammengeführt.

4.1.2.2 Matching

Nachdem die Posterdatenbanken M_P und die Kameramerkmale vorliegen erfolgt die Korrespondenzsuche. Hierzu werden die Merkmale aus M_K mit den Merkmalen aus M_P verglichen. Die Postermerkmale M_P enthalten Informationen, welche Intensitäten an dem jeweiligen Rasterpixel selten aufgetreten sind.

Damit ein aktuelles Merkmal K einem Postermerkmal P zugewiesen werden kann, dürfen Intensitäten in K nur dann auftreten, wenn diese in P ebenfalls häufig aufgetreten sind, also in der binären Repräsentation nicht maskiert sind. Durch die Abspeicherung der Merkmale im Bit-Format ist dies durch schnelle Bit-Operationen zu bestimmen. Der Vergleich der Merkmale kann durch eine logische UND-Operation durchgeführt werden:

$$M = K \cap P$$

Die Anzahl der Kollisionen e ergibt sich aus der Anzahl der gesetzten Bits in M und kann durch einen schnellen Bit-Zähler bestimmt werden. Die Kollisionen dienen als Ähnlichkeitsmaß zwischen Merkmalen. Zwei Merkmale werden als korrespondierend betrachtet, wenn die Bedingung $e \leq e_{max}$ erfüllt ist.

Um den Suchaufwand zu reduzieren wird nach [9] für jedes Untermerkmal in M_P und Merkmal in M_K ein 5-Bit Index erstellt. Dieser ergibt sich aus fünf binär quantisierten Pixelwerten um den Merkmalspunkt p. Die genutzten fünf Pixel sind in Abbildung 1 mit Zahlen markiert. Für die zusammengefassten HIP-Merkmale in der Posterdatenbank M_P werden die fünf häufigsten Indizes der genutzten Untermerkmale dem HIP zugewiesen. Die HIPs werden entsprechend ihrer Indizes in eine Hashtabelle eingefügt. Mehrfacheinordnungen resultieren in einer Kopie des Merkmals. Zur Laufzeit wird ein Kamerabildmerkmal K lediglich mit Merkmalen in M_P mit dem gleichen Index verglichen.

Die Indexierung der Posterdatenbank reduziert zwar die Anzahl der benötigten Vergleiche, jedoch ist der Suchaufwand innerhalb eines Index weiterhin linear. Mit Hilfe eines Baumes als Datenstruktur für die Merkmale kann dies auf logarithmischen Aufwand verringert werden. Der Aufbau des Baumes wurde nach [6] umgesetzt. Es wird hierbei ein binärer Baum verwendet, der in den Knoten $5x64$ Bit Werte und in den Blättern die HIP-Merkmale P enthält.

Es wird für jeden Index in der Datenbank eine Sammlung von Bäumen angelegt. Zu Beginn ist jedes Merkmal im Index als ein Wurzelknoten klassifiziert. Anschließend werden die zwei Merkmale mit den meisten übereinstimmenden gesetzten Bits (in der binären Repräsentation) zusammengeführt.
Der Und-verknüpfte beider Merkmale wird als der neue Eltern- und gleichzeitig Wurzelknoten mit den beiden Merkmalen als Kinder angelegt. Der neue Elternknoten wird in die Sammlung der Bäume des entsprechenden Index einsortiert und die beiden zusammengeführten Merkmale entfernt. Dieser Vorgang des Zusammenführens und Entfernens wird wiederholt, bis entweder nur ein Wurzelknoten existiert oder die Wurzelknoten keine übereinstimmenden gesetzten Bits haben.

Zur Laufzeit werden bei der Suche die Wurzelknoten der Baumsammlung mit dem aktuellen Merkmal K verglichen. Ist der Kollisionswert e kleiner als der maximal zulässige Wert wird dieser Baum weiter betrachtet. Sollte dies nicht gegeben sein kann der komplette Baum verworfen werden. Bei positivem Vergleich wird durch den Baum traversiert. Bei der Suche werden mehrere Treffer akzeptiert.

4.1.2.3 Verifizierung der Korrespondenzen

Ein Kameramerkmal K kann mehrere Korrespondenzen mit der Posterdatenbank M_P haben. Um eine zuverlässige Posenbestimmung zu gewährleisten, müssen Fehlkorrespondenzen berücksichtigt werden. Durch Schätzverfahren, wie RANSAC [13], können trotz mehrerer Fehlkorrespondenzen korrekte Werte gefunden werden. Bei zu vielen Fehlkorrespondenzen oder schlechter erster Schätzung kann die Optimierung ein falsches Ergebnis liefern. Daher ist es nötig, eine Vorsortierung der Korrespondenzen durchzuführen.

Gemäß [9] wird eine Überprüfung der Ergebnisse auf Konsistenz bezüglich der Anlernposition durchgeführt. Zusätzlich zu den HIP-Merkmalen in der Posterdatenbank wird gespeichert, aus welcher Position der virtuellen Kamera in der Anlernphase das Merkmal extrahiert wurde. Für die Verifizierung der Korrespondenz zur Laufzeit werden zunächst die am meisten aufgetretenen Ansichten bestimmt. Korrespondenz außerhalb dieser Ansichten können somit verworfen werden [9].

4.1.3 Posenbestimmung

Die nun vorliegenden Korrespondenzen sind von Fehlern beseitigt und können für die Posebestimmung genutzt werden. Es wurde sich für einen zweistufigen Ansatz entschieden. Anstatt das PnP-Problem [14] (perspective-n-point Problem) mit $n > 4$ Punkten zu lösen werden mittels RANSAC verifizierten Punkte genutzt, um die 2-D-Homographie zu bestimmen. Diese wird genutzt, um die vier Eckpunkte des Posters im Kamerabild zu berechnen. Hierzu werden die Eckpunkte des Posters aus der An-

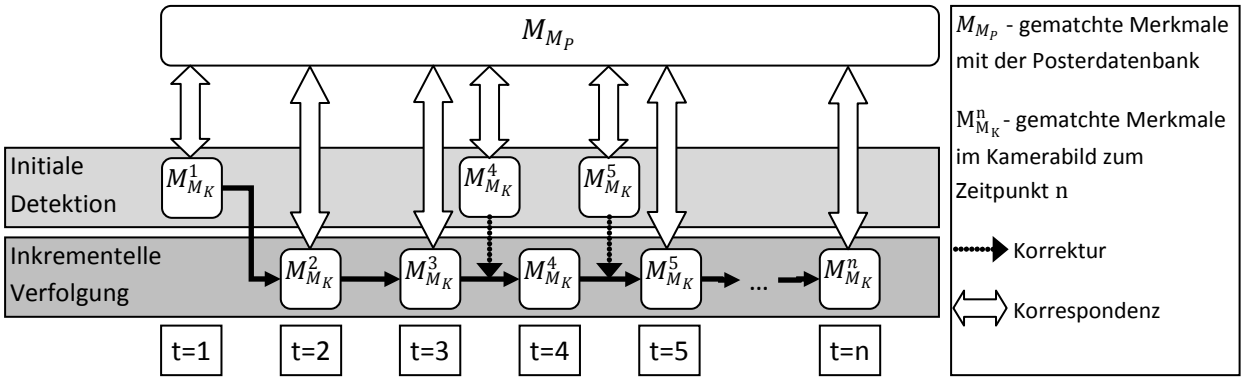


Abbildung 3: Beispielhafter Ablauf des Trackings. Zum Zeitpunkt t=1 wird ein initiales Tracking durchgeführt. In den folgenden Zeitpunkten werden die Merkmale im Kamerabild aus dem Vorgängerbild mittels Bewegungsanalyse inkrementell verfolgt. Die Korrespondenzen mit dem Poster bleiben erhalten. Zu den Zeitpunkt t=4 und t=5 wird eine Korrektur der inkrementellen Verfolgung mittels der initialen Detektion durchgeführt.

lernphase mit der Homographie-matrix transformiert. Das Ergebnis sind die 2-D-Eckpunkte im Kamerabild.

Diese vier Eckpunkte des Posters im Kamerakoordinatensystem und die Eckpunkte des Posters im Weltkoordinatensystem werden genutzt, um das PnP-Problem zu lösen und somit die Pose des Objektes im Weltkoordinatensystem zu bestimmen.

4.2 Bewegungsanalyse

Das bisher beschriebene Tracking auf Basis der Merkmalsdetektion stellt für den beschriebenen Anwendungskontext eine wesentliche Basistechnologie dar. Eigene anwendungsbezogene Untersuchungen haben weiteres Optimierungspotential bezüglich der Performanze und Robustheit identifiziert. So ist beispielsweise der durch das Tracking abgedeckte Erfassungsbereich beschränkt durch den Umfang der in der Anlernphase generierten Posterdatenbank. Aus Gründen der Stabilität und Performanz kann die Posterdatenbank nicht beliebig groß angelegt werden.

Weiterhin enthält die Posterdatenbank nur statistische Werte und keine genaue Beschreibung der Merkmalsausprägung. Daher treten bei dem Matching Ungenauigkeiten auf, die sich auf die Bestimmung der Pose auswirken. Vor allem bei Bildrauschen der realen Kamera kann dies zu Instabilitäten der bestimmten Pose führen, wodurch ein deutliches "Zittern" der überlagerten Modelle auftreten kann, was für die Zielanwendung nicht akzeptabel ist. Um die genannten Probleme zu lösen, wird nach einer initialen Detektion das Tracking des Posters mit einer Bewegungsanalyse ergänzt. Diese bestimmt die Translationen von Regionen in aufeinanderfolgenden Kamerabildern. Zum Einsatz kommt das Verfahren nach dem optischen Fluss nach [10], welches Merkmalspositionen aus dem vorherigen Bild in dem aktuellen Bild wiederfindet. Hierzu wird in einem eingeschränkten Suchbereich um die Merkmalsposition die neue Position gesucht.
Für eine effizientere Suche auch bei großen Suchbereichen wird diese in mehreren Auflösungsstufen in einer Bildpyramide durchgeführt.

Die Integration der Bildanalyse (inkrementelle Verfolgung) in den Workflow ist in Abbildung 3 dargestellt. Zunächst wird die initiale Detektion durchgeführt. Aus dieser gehen Merkmale im aktuellen Kamerabild mit deren Korrespondenzen im Posterkoordinatensytem und die bestimmte Homographie hervor. Im darauf folgenden Kamerabild werden nun mit dem optischen Fluss die neuen Positionen der Merkmale im aktuellen Bild ($t = 2$) bestimmt. Da die bereits bekannten Korrespondenzen mit den Punkten im Posterkoordinatensystem erhalten bleiben, kann mit den neuen Punkten im Kamerabild ($t = 2$, $t = 3$) eine Homographie und daraufhin die Pose des Objektes bestimmt werden.

Da eine inkrementelle Verfolgung eine relative Positionsveränderung von Bild zu Bild bestimmt und diese mit jeweils Ungenauigkeiten behaftet ist, tritt über die Zeit ein größer werdender Fehler bezüglich der korrekten Pose auf ("Drift"). Um dies zu kompensieren, wird in regelmäßigen Abständen eine initiale Detektion zur Korrektur der Pose durchgeführt (siehe Abbildung 3, $t = 4$). Darüber hinaus wird der Suchbereich der initialen Detektion auf Basis der Bewegungsinformation für eine schnellere Berechnung und Steigerung der Stabilität eingeschränkt. Bei erfolgreicher Bestimmung einer Homographie der initialen Detektion werden deren Ergebnisse gewichtet auf die Ergebnisse der inkrementellen Verfolgung angewandt. Die Gewichtung ermöglicht eine kontinuierliche Korrektur über die Zeit und verhindert eine sprunghafte Änderung der Pose. Um trotz der Gewichtung eine vollständige Korrektur zu ermöglichen, wird die initiale Detektion durchgeführt, bis die Abweichung zwischen der vom

optischem Fluss und der initialen Detektion bestimmten Pose unterhalb eines Schwellernwertes liegt ($t = 5$). Da bei der Bewegungsanalyse nicht alle Punkte wiedergefunden werden, würde der Verlust an Merkmalen über die Zeit zu einer Verringerung der Genauigkeit der Pose und im Extremfall zum Abbrechen des Trackings führen. Um die Anzahl der Punkte stabil zu halten, wird sowohl nach der ersten initialen Detektion, als auch nach jedem inkrementellen Verfolgen eine Neusuche nach Merkmalen mit Hilfe des FAST-Detektors mit einem adaptiven Schwellenwert t_{FAST} durchgeführt. Die neuen Merkmale werden mit Hilfe der invertierten Homographie vom Kamerabildkoordinatensystem in das Posterkoordinatensystem projiziert, um die Korrespondenzpartner zu den Kamerabildpunkten zu erhalten.

5 Ansätze zur Interaktion

Abbildung 4: Augmentierung eines 3-D-Modells und einer Schaltfläche, die durch Nutzerinteraktion aktiviert werden kann

Um zusätzlich zur Echtzeitüberlagerung der virtuellen Information auch eine einfache und intuitive Interaktion mit dem AR-System zu ermöglichen, wurden verschiedene Ansätze eruiert. Dabei bestand das Ziel, ohne zusätzliche Bedienhardware auszukommen. Es wurde ein Ansatz untersucht, mit dem eine direkte Interaktion über das reale Objekt möglich ist (s. Abbildung 3). Damit können sensitive Regionen als Interaktionsschaltflächen auf dem Objekt definiert und durch einfache Handgesten aktiviert werden und beispielsweise für die Steuerung dynamischer AR- Inhalte verwendet werden. Zum Einsatz kommen hierbei Analyseverfahren zur Detektion von Verdeckungen und Hautfarben im Kamerabild.

Nach dem Erfassen des Posters wird mit der dabei bestimmten Homographie der Bereich der vorab definierten Schaltfläche in Ausgangslage rückprojiziert. Das Ergebnis ist ein entzerrtes Bild der Schaltfläche. Für die Erkennung einer Aktivierung dieser Schaltfläche wurden Ansätze zur Änderungsdetektion mittels Differenzbildern und zur Hautfarbenerkennung untersucht. Das Prinzip des Differenzbildes basiert auf dem Vergleich eines Referenzbildes mit dem aktuellen Bild. Das Referenzbild wird bei der erstmaligen Detektion des Posters aus dem rückprojizierten Bild der Schaltfläche erstellt. Mittels Kreuzkorrelation wird das aktuelle Bild auf Ähnlichkeit mit dem Referenzbild untersucht. Ist das Ähnlichkeitsmaß zwischen diesen beiden Bilder nicht oberhalb einer definierten Schwelle, wird die Schaltfläche aktiviert und die daran gekoppelte Interaktion ausgeführt. Da bei diesem Verfahren der gesamte Schaltflächenausschnitt genutzt wird, kann bei ungenauem Tracking, der Fehler zwischen den Bildern über den Aktivierungswert steigen. Somit würde eine Fehldetektion auftreten. Um einen geringen Fehler des Trackings zu kompensieren, wird daher das Referenzbild aktualisiert. Dies geschieht über den gewichteten Mittelwert des vergangen Referenzbildes mit dem aktuellen Bild. Ebenfalls werden auf diese Weise Lichtveränderungen berücksichtigt.

Da die Erkennung der Aktivierung einer Schaltfläche mit dem Differenzbildverfahren relativ anfällig bezüglich für Fehlern beim Tracking oder bei Bewegungsunschärfe ist, wurde ein weiteres Verfahren untersucht. Mit Hilfe von Hautfarbenerkennung im Schaltflächenbereich wird hierbei erkannt, ob der Anwender einen Finger oder die Hand in die Schaltfläche bewegt.

Für die Hauterkennung wird zunächst das Eingangsbild in den HSV-Farbraum (H - Farbton, S - Farbsättigung, V - Helligkeit) konvertiert. Anschließend werden die einzelnen Kanäle auf ihre Werte geprüft. Es werden einfache Schwellenwerte für jeden Kanal angewandt. Ein Pixel x wird als Haut klassifiziert, wenn die folgende Bedingung bezüglich der Farbkanäle erfüllt ist:

$$f(x_i) = \begin{cases} 255, & 0 \leq H \leq 90 \; und \; 80 \leq \{S, V\} \leq 230 \\ 0, & sonst. \end{cases}$$

Das Ergebnis ist ein binäres Bild, bei dem ein als Haut klassifizierter Pixel den Wert 255 annimmt.
In dem Binärbild werden nun die Hautpixel gezählt. Liegt der prozentuale Anteil an Hautfarben im Schaltflächenbereich oberhalb des Aktivierungsschwellwertes, wird die Schaltfläche aktiviert.

Die Hautfarbenerkennung ist abhängig von den vorhandenen Lichtbedingungen. Wird durch künstliches Licht der Farbton des Bildes verfälscht, kann es zu fehlerhafter Klassifizierung der Pixel als Haut kommen. Ebenfalls können Probleme auftreten, wenn im Interaktionsbereich andere hautfarbenähnliche Strukturen auftreten, da diese immer als Haut klassifiziert werden. Sind diese Bereiche klein, so kann dies durch Anpassen des Aktivierungswertes kompensiert werden. Die Schaltflächen ermöglichen eine einfache Interaktion mit den virtuellen Informationen. Bei einem Video bietet sich die Steuerung via Schaltflächen für Start, Pause oder Zurückspulen an. Gleiches gilt auch für 3-D-Modelle, welche Animationen enthalten.

Ebenfalls sind einfache interaktive Transformationen, wie Skalieren, Verschieben oder Rotieren des virtuellen Objektes möglich. Über eine zeitliche Komponente kann bei gedrückter Schaltfläche die Aktion kontinuierlich ausgeführt werden.

6 Evaluierung

Es wurde eine Evaluierung des entwickelten Trackingverfahren durchgeführt. Hierzu wurden synthetische Testsequenzen erstellt, um die verschiedenen Einflüssen von Translation und Rotation des zu trackenden Objekts zu ermittelt. Der Vorteil solcher künstlichen Bilder liegt darin, dass die korrekte Pose bekannt ist und damit die absolute Genauigkeit der ermittelten Pose des Trackings bestimmt werden kann.

Für die Bestimmung der Genauigkeit wurden die Ergebnisse der einzelnen Testreihen gemittelt und die Standardabweichung bestimmt. Aus diesen ergab sich eine Genauigkeit in der bestimmten Position von 2,17 Millimetern mit einer Standardabweichung von 0,25. Die bestimmte Orientierung hat eine Genauigkeit von 0,179 Grad mit einer Standardabweichung von 0,113. Die erreichten Werte sind für die geplanten Anwendungen im Bereich Marketing hinreichend.

Es wurde weiterhin die benötigte Rechenzeit des Trackings bestimmt. Hierzu wurde für mehrere Sekunden eine Aufnahme mit einer realen Kamera durchgeführt. Die Kamera und das Poster wurden hierfür nicht bewegt, wobei sich das Poster innerhalb des angelernten Trackingbereich befunden hat. Es ergab sich eine durchschnittliche Berechnungszeit des initialen Trackings von 10,899 Millisekunden, für das inkrementelle Tracking von 8,961 Millisekunden und für die Detektion der Interaktion von 3,666 Millisekunden. Somit wird bei einer Kamera mit einer Bildwiederholungsrate von 30 Bildern pro Sekunde diese für die gesamte Anwendung erreicht.

7 Beispielanwendung

Die entwickelten Technologien wurden im Rahmen eines Industrieprojektes eingesetzt. Für den Auftraggeber Vakoma[4] wurde eine AR-basierte Anwendung entwickelt, welche das Produktmarketing der Firma im Bereich der Instandsetzung von Getrieben für Industrieanlagen unterstützt. Diese Produkte können aufgrund ihrer Dimension auf Messen nicht in real präsentiert werden. Um den Kunden die Produkte zu präsentieren und zu erklären werden deren virtuelle 3-D-Modelle auf einem realen Produktkatalog augmentiert (s. Abbildung 5). Für die entwickelte Beispielanwendung wurde ein Prospekt beinhalten neben gedruckten Produktinformationen drei Schaltflächen für die Nutzerinteraktion.

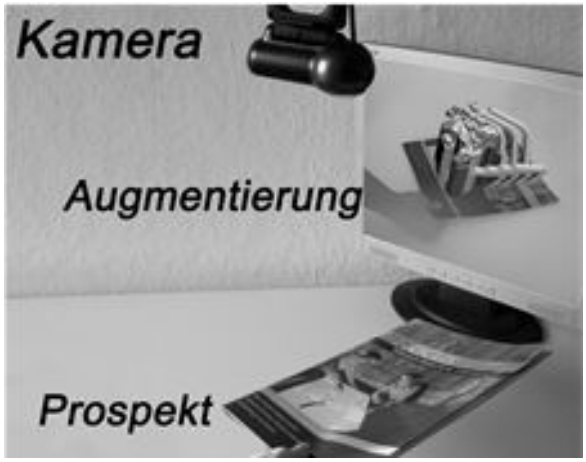


Abbildung 5: Konzept eines Standsystems zur Augmentierung von interaktiven 3-D-Modellen auf einem Produktkatalog

Die jeweilige Katalogseite dient als das Poster für das Tracking. Die Interaktionsschaltflächen wurden außerhalb des Posterbereiches platziert, da hierdurch eine Beeinflussung des Trackings bei der Interaktion weitestgehend vermieden wird. Die zur Wahl stehenden Interaktionen sind das Pausieren der interaktiven 3-D-Animation und der Auswahl der Abspielrichtung. Dem Anwender wird auf die jeweilige Katalogseite ein animiertes 3-D-Modell des dort abgebildeten und beschriebenen Produktes augmentiert. Diese kann durch Drehen des realen Kataloges aus verschiedenen Ansichten betrachtet werden. Die zusätzlichen Interaktionensmöglichkeiten erlauben es dem Anwender, die Animationen nach Belieben zu steuern.

8 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde Trackingverfahren vorgestellt, welches als Basistechnologie im Bereich Marketing eine neue Art der Produktpäsentation unterstützen kann. Das Tracking besteht aus einer initialen Detektion über den Abgleich von Merkmalen im Kamerabild und Merkmalen aus einer zuvor angelernten Datenbank sowie der Verfolgung mittels Verfahren der Bewegungsanalyse. Durch die Kombination dieser Komponenten kann die Pose eines beliebigen texturierten, planaren Objekts in Echtzeit robust ermittelt werden.

Weiterhin wurden erste Ansätze für Interaktionen auf direkt auf dem planaren Objekt vorgestellt, die eine Steuerung der virtuellen Inhalte ermöglichen. Unter Nutzung der vorgestellten Technologien wurde ein AR-Standsystem für Messeauftritte entwickelt, mit dem kundenindividuelle Produktpräsentationen unterstützt werden. In den folgenden Arbeiten wird der Fokus der Entwicklung vor allem in der Erweiterung der Interaktions-

4 http://www.vakoma.de/ - Version: 02.04.2012 14:30 Uhr

möglichkeiten, sowie der Steigerung der Robustheit der Erkennung der Interaktion liegen.

9 Literaturverzeichnis

[1] J. Moré, „The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory," in *Numerical Analysis*, 630 Hrsg., Springer Berlin / Heidelberg, 1978, pp. 105--116.

[2] D. Wagner, T. Langlotz und D. Schmalstieg, „Robust and unobtrusive marker tracking on mobile phones," 2008.

[3] D. Anderson, „Implementierung und Evaluierung eines markerlosen Tracking-Algorithmus in einem modularen Tracking-Framework auf Windows-PCs und Windows Mobile-Smartphones," 2010.

[4] J. Park, S. You und U. Neumann, „Extending augmented reality with natural feature tracking," 1998.

[5] J. P. Suya, J. Park, S. You und U. Neumann, „Natural Feature Tracking for Extendible Robust Augmented Realities," 1998.

[6] S. Taylor und T. Drummond, „Binary Histogrammed Intensity Patches for Efficient and Robust Matching," *International Journal of Computer Vision,* Nr. 94, pp. 241-265, 2011.

[7] D. Wagner, D. Schmalstieg und H. Bischof, „Multiple target detection and tracking with guaranteed framerates on mobile phones," 2009.

[8] D. Lowe, „Object recognition from local scale-invariant features," 1999.

[9] S. Taylor, E. Rosten und T. Drummond, „Robust feature matching in 2.3µ," in *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2009. CVPR Workshops 2009. IEEE Computer Society Conference*, 2009.

[10] J.-Y. Bouguet, „Pyramidal implementation of the Lucas Kanade feature tracker," *Intel Corporation, Microprocessor Research Labs,* 2000.

[11] E. Rosten und T. Drummond, „Machine Learning for High-Speed Corner Detection," in *Computer Vision -- ECCV 2006*, Bd. Lecture Notes in Computer Science, Springer Berlin / Heidelberg, 2006, pp. 430-443.

[12] K. Mikolajczyk und C. Schmid, „A Performance Evaluation of Local Descriptors," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.,* Bd. 27, pp. 1615-1630, 2005.

[13] M. Fischler und R. Bolles, „Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," *Commun. ACM,* Bd. 24, pp. 381-395, 1981.

[14] R. Szeliski, Computer Vision: Algorithms and Applications, 1st Hrsg., Springer-Verlag New York, Inc., 2010.

PROBENANALYSESYSTEM EINER WIRBELSCHICHT-VERSUCHSANLAGE ZUR UNTERSUCHUNG DES FESTSTOFFUMSATZES VON BIOMASSEN

Dipl.-Ing. Franka Kretschmer
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Verfahrenstechnik

Johannes Haus
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Verfahrenstechnik

Dr. Eyck Schotte
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Verfahrenstechnik

Prof. Dr. Evangelos Tsotsas
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Verfahrenstechnik

PROBENANALYSESYSTEM EINER WIRBELSCHICHTVERSUCHSANLAGE ZUR UNTERSUCHUNG DES FESTSTOFFUMSATZES VON BIOMASSEN

Dipl.-Ing. Franka Kretschmer, Johannes Haus, Dr. Eyck Schotte, Prof. Dr. Evangelos Tsotsas, Institut für Verfahrenstechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

1 Einleitung

1.1 Wirbelschichtprozesse zur thermochemischen Biomassekonversion

Die Möglichkeit Wirbelschichttechnologie für energietechnische Zwecke einzusetzen, wurde mit der Holzvergasung schon frühzeitig erkannt und erlangt nun aufgrund der ökologisch-klimatischen Probleme neue Bedeutung. Dazu wurde das Brennstoffspektrum zugunsten der Biomassen wesentlich erweitert. Um die Rolle einnehmen zu können, die man der Biomassenutzung für die zukünftige Energiegewinnung zuschreibt, müssen die Prozesse jedoch weiter optimiert werden. Dies kann unter anderem durch verbesserte Regelungskonzepte geschehen, die auf Modellen basieren. In diesem Fall sollen Populationsbilanzen die Grundlage des Modells bilden, für die die Eigenschaftsverteilungen (u.a. der Partikelgröße) entscheidend sind [1]. Das Modell beschreibt die Änderung dieser Verteilungen, welche von Umsatz- und Abbrandkinetiken bestimmt wird.

1.2 Motivation und Herausforderung

Um das zur Regelung zu verwendende Populationsbilanzmodell zu parametrisieren und später zu validieren, ist die Kenntnis über die Partikelgrößenverteilung des Brennstoffs im Wirbelbett unerlässlich. Daraus ergibt sich das Ziel, Proben aus dem Reaktor zu entnehmen und diese bezüglich der Größenverteilung der Brennstoffpartikel zu analysieren. Die Schwierigkeit besteht dabei in den hohen Anforderungen an ein Probenahmesystem für Hochtemperaturprozesse wie Verbrennung und Vergasung, die wie folgt charakterisiert werden können:

- hohe Prozesstemperatur von 750 - 900°C
- Reaktionsunterbrechung nach Probenahme
- Verhinderung von Brand- und Explosionsgefahr bei der Beprobung des Vergasungsprozesses

2 Grundlagen

2.1 Prozessbedingungen

Eine Probe aus einem laufenden Prozess zu entnehmen soll die Funktion haben, den Inhalt des Probenahmeraumes mit seinen Eigenschaften wiederzugeben. Dabei muss eine bestimmte Reproduzierbarkeit gegeben sein. Daher ist es notwendig die Probenahme anpassbar bezüglich der Prozessbedingungen zu gestalten. In der Wirbelschicht hängt die Qualität und Quantität der Probe hauptsächlich von folgenden Prozessfaktoren ab:

- Art des Bettes (Bettmaterial, Brennstoff)
- Bettmasse (Expandierte Betthöhe)
- Korndurchmesser
- Prozesstemperatur
- Fluidisationszustand ($fWZ=u/u_{MF}$)

2.2 Partikelprobenahme aus heißgehenden Wirbelschichten

In der Vergangenheit hat es bereits Bestrebungen gegeben, die internen Vorgänge in Wirbelschichtapparaten zu untersuchen und abzubilden. Entsprechend der Vielzahl von Untersuchungszielen am Objekt „Wirbelschicht" finden verschiedenste Messmethoden Anwendung, die vorrangig Unterschiede in punkto Messprinzip, Messort und Probeentnahme aufweisen [2]. Untersuchungen von Phänomenen wie Wirbelschichtstruktur (Blasenbildung, Durchmischung) und Umsatzverhalten von Materialien wurden im Hochtemperaturbereich mittels extern positionierter Lasermeßtechnik [3] oder durch faseroptische Messstechnik [4] am Messobjekt in-situ durchgeführt. Die direkte Probenahme aus dem heißen Prozess lässt sich jedoch auf eine verwendete Technik zusammenfassen, wie sie in [5] dargestellt wird: Ein außen schräg nach unten geneigter Stutzen ragt in das Bett hinein und kann durch einen Stempel geöffnet oder verschlossen werden. Dieses System wird per Hand bedient und unterliegt durch den Quarzsand höchster Verschleiß- und Ausfallanfälligkeit.

3 Entwicklung Probenentnahmesystem (PES)

Die Eigenentwicklung zur Probenentnahme ergab sich aus diesen Schwierigkeiten und mit dem Kriterium auch Proben aus einem Vergasungsprozess zu entnehmen, was mit einem System zur Probenahme in Verbrennungsräumen nicht möglich ist. Bei den bekannten Systemen ist die Gefahr von Sauerstoffeintrag in den Brenngasprozess sehr hoch. So leitet sich auch die Notwendigkeit her, ein geschlossenes System zu entwickeln, welches auch mit Brenngas kein explosionsgefährdetes Aggregat darstellt. Außerdem kann durch automatisiertes Handling eine Reproduzierbarkeit sichergestellt werden und kontinuierliche, automatische Probenahme erfolgen.
Konstruktiv wurde sich für die Variante mit Vakuum entschieden, da andere Fördermöglichkeiten entweder durch Sandreibung äußerst verschleißanfällig (Schieber) oder aber einfach zu langsam (Schnecke) gewesen wären.

3.1 Aufbau des Probenahmesystems (PES)

In Zusammenarbeit mit den Firmen Retsch GmbH und AVA GmbH wurde das in Abbildung 1 dargestellte Probenahmesystem entwickelt.

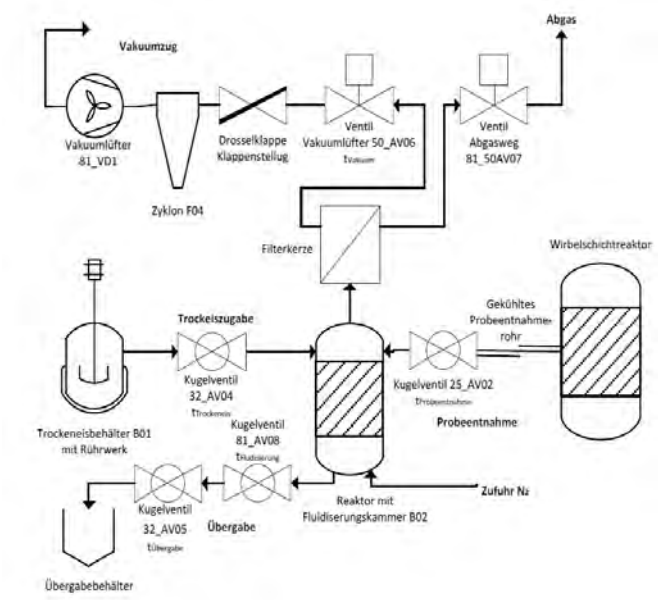


Abbildung 1: R-I-Fließbild Probenahmesystem

Das Probeentnahmesystem besteht hauptsächlich aus einer WS-Fluidisationskammer (B02), die das Trockeneis mit der gezogenen Probe durch Fluidisierung mit N_2 vermischt und diese somit abkühlt. Peripher sind zu nennen und im Fließbild erkennbar:

- einem Lüfter 81_VD1 zum Erzeugen eines Unterdrucks im Probeentnahmebehälter,
- einem Trockeneisbehälter B01 zur Lagerung und Zugabe von Trockeneis,
- und einer Übergabevorrichtung, die dann die Probe derzeit in ein Auffanggefäß übergibt (kann später direkt in den CAMSIZER erfolgen).

3.2 Funktionsweise

Die Probenahme basiert bei diesem System auf dem Effekt des Druckausgleichs. Um den vom Sauggebläse erzeugten Unterdruck auszugleichen, wird Bettmaterial aus dem Reaktor in die Wirbelschichtkühlreaktor gezogen.

Die Funktionsweise des PES wird in seinen Einzelschritten nachfolgend beschrieben.

1. Die Drosselklappe, die den Querschnitt des Rohres, über welches das Vakuum gezogen wird, verändern kann, wird per Hand eingestellt
(Parameter: Klappenstellung).

2. Der Ansaugstutzen zum Reaktor wird durch Öffnen eines Kugelventils (81_10AV01) mit Stickstoff gespült
(Parameter: Spülung $t_{Spülung}$).

3. Durch den Trockeneisbehälter wird über Kugelventil 32_AV04 Trockeneis in den Reaktionsraum hinzugegeben.
(Parameter: Trockeneiszugabe $t_{Trockeneis}$)

4. Das Gebläse erzeugt einen Unterdruck im Probeentnahmebehälter
(Parameter: Vakuumziehzeit t_{Vakuum}).

5. Die Schleuse zum Wirbelschichtreaktor(25_AV02) wird geöffnet und eine Probe
(Parameter Probeentnahmezeit $t_{Probeentnahme}$)
in den WS-Kühlreaktor gezogen.

6. Das nun vorliegende Gemisch wird in der Wirbelkammer (B02) fluidisiert, dabei intensiv durchmischt und abgekühlt.
(Parameter: Fluidisationszeit $t_{Fluidisierung}$).

7. Die Probe wird mit Hilfe eines schwenkbaren Bodens und durch die Schleuse (Ventile 81_AV08 und 32_AV05) nach unten ausgegeben.
(Parameter: Übergabezeit $t_{Übergabe}$).

Die Parametereinstellung erfolgt durch eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS), die Bestandteil der Prozessleittechnik (PLT) des Wirbelschichtreaktors ist. Der Ablauf erfolgt bis auf das Einstellen der Drosselklappe somit automatisiert.

3.3 Kühlprozess

Mit Hilfe des Kühlsystems soll die entnommene Probe von der Betriebstemperatur des Wirbelschichtreaktors, je nach Versuch von 600°C – 900°C, schlagartig auf 100°C herunter gekühlt werden, um eine weitere thermochemische Umwandlung der Partikel zu verhindern. Die Abkühlung und Mischung erfolgt in der Fluidisations-kammer.
Für die Kühlung wird Trockeneis verwendet. Das Kühlsystem besteht aus einem Trockeneisbehälter samt Rührwerk und Antriebsmotor. Ein Kugelhahn dient als Schleuse für die Trockeneiszugabe. Bei Kühlung wird der Fluidisationskammer zuerst Trockeneis zugeführt und dann die Probe gezogen. Anschließend wird die Probe durch das Durchströmen mit N_2 fluidisiert und damit durchmischt.

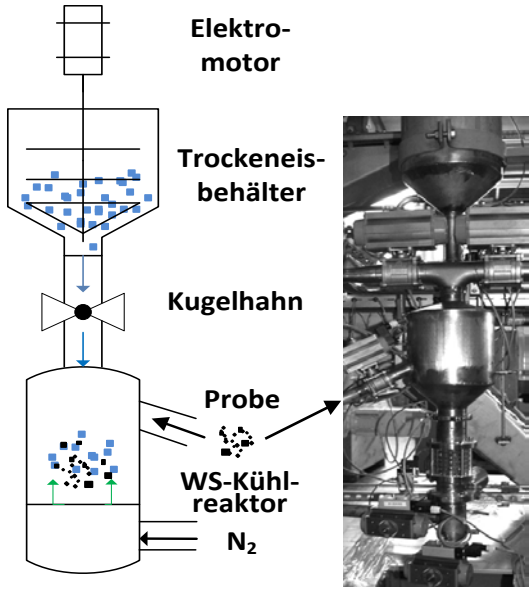


Abbildung 2: Schema und Foto des Wirbelschichtkühlreaktor

Die notwendige Kühlleistung, die durch das Trockeneis erbracht werden muss, wurde vereinfacht mit folgendem Zusammenhang berechnet:

$$dQ = m_{Sand} \cdot c_{p,Sand} \cdot dT$$

$$\Delta Q = m_{Sand} \cdot c_{p,Sand} \cdot \left(T_{Bett} - T_{Übergabe}\right) \quad (3.1)$$

Durch Gleichsetzen der Sublimationsenthalpie des Trockeneises (CO_2)

$$\Delta Q = m_{CO_2,\ solid} \cdot \Delta H_{Sub} \quad (3.2)$$

mit der in 3.1. errechneten Kühlleistung, kann nun die notwendige Trockeneismenge mit

$$m_{CO_2,\ solid} = \frac{m_{Sand} \cdot c_{p,Sand} \cdot (T_{Bett} - T_{Übergabe})}{\Delta H_{Sub}} \quad (3.3)$$

berechnet werden.

Dabei wird der Wärmeverlust nach außen und an das durchströmende N_2 vernachlässigt, um bei auftretenden Schwankungen der Probenmasse Kühlreserven vorzuhalten.

Das Trockeneis wird in Pelletform mit einem Durchmesser von 2-3 mm dem Kühlreaktor zugeführt, wodurch eine gleichmäßige Fluidisierung zusammen mit der Probe möglich ist. Durch den guten Wärme- und Stoffübergang in dem WS-Kühlreaktor verschwinden die Trockeneispellets nach einigen Sekunden der Fluidisierung und die Probe kann mit stark gesenkter Temperatur übergeben werden.

Aus Gleichung 3.3 wird die Temperaturabhängigkeit der notwendigen Trockeneismasse deutlich, die hier im Diagramm (Abb.3) dargestellt ist:

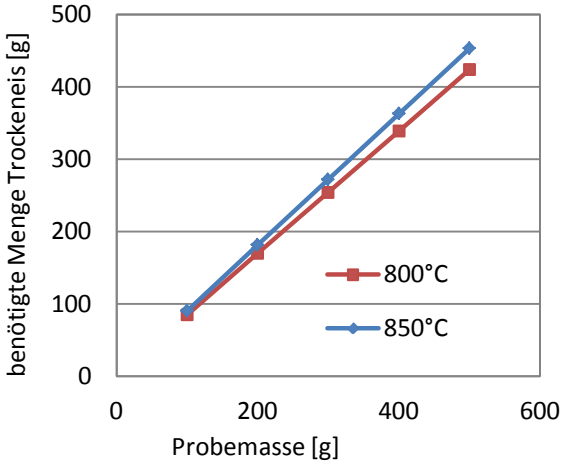


Abbildung 3: Abhängigkeit der notwendigen Trockeneismenge von Probenmasse und Betttemperatur

4 Parametrisierung

4.1 Parameter zur Justierung des PES

Das Ziel der Parametrisierung des PES besteht darin, eine konstante Probenmasse zu erhalten, die den Korngrößenhaushalt des Reaktorbettes wiedergibt. Um dies zu erreichen, können folgende Parameter variiert werden:

- Vakuumgenerierungszeit
- Probenahmezeit
- Klappenstellung

Um den Einfluss der oben genannten Parameter auf die Menge der Probe zu quantifizieren, wurden diese einzeln unter verschiedenen Bedingungen untersucht.
In den folgenden Grafiken sind die Messergebnisse dazu dargestellt. Zunächst wurde die Auswirkung der Gebläselaufzeit zur Generierung des Unterdrucks analysiert.

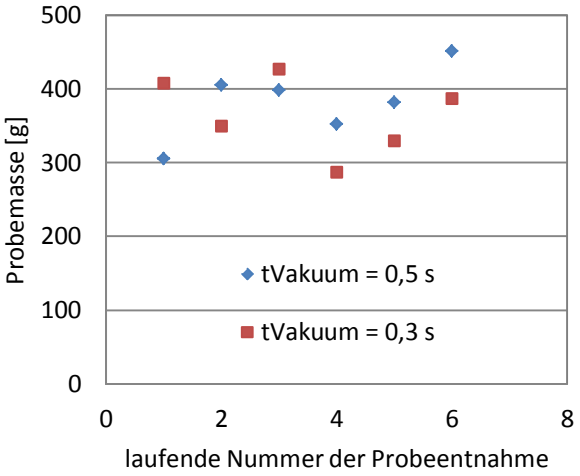


Abbildung 4: Einfluss der Vakuumgenerierungszeit auf die Probenmasse

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse zur Untersuchung des Einflusses der Vakuumgenerierung auszugsweise dargestellt. Es ist festzustellen, dass die Vakuumziehzeit t_{Vakuum} keinen Einfluss auf die Probeentnahme hat.
Als zweiter Faktor wurde die Öffnungszeit des Probenahmeventils untersucht.

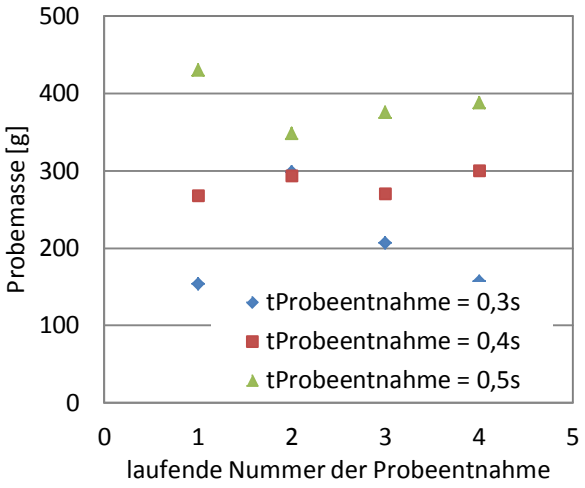


Abbildung 5: Einfluss der Öffnungszeit auf die Probenmasse

Wie in der obigen Grafik (Abbildung 5) eindeutig zu erkennen, ist dieser Parameter entscheidend für die Menge der Probe. Umso länger das Ventil geöffnet bleibt, desto größer ist die Probemasse.
Dieser Zusammenhang lässt sich für dieses System empirisch folgendermaßen ausdrucken:

$$m_{Probe}\ [g] = 1025\ [g/s] \cdot t_{Probeentnahme} - 130\ [g] \qquad (3.5)$$

Die Probenmasse ist jedoch durch die Kapazität des WS-Kühlreaktors begrenzt und sollte 500 g nicht überschreiten.Die Klappenstellung der Rohrleitung zum Sauggebläse war ebenfalls Gegenstand der Untersuchung, wobei festgestellt wurde, dass

- eine Klappenstellung zwischen 0° und 50° keine Auswirkung auf die Probemasse hat,
- bei 60° sich die Probemasse um durchschnittlich 35% verringert,
- ab 70° keine nachweisbare Probe mehr gezogen wird.

In der grafischen Darstellung (Abb. 6) ist deshalb nur der Bereich, in dem Abhängigkeiten bestehen, abgebildet.

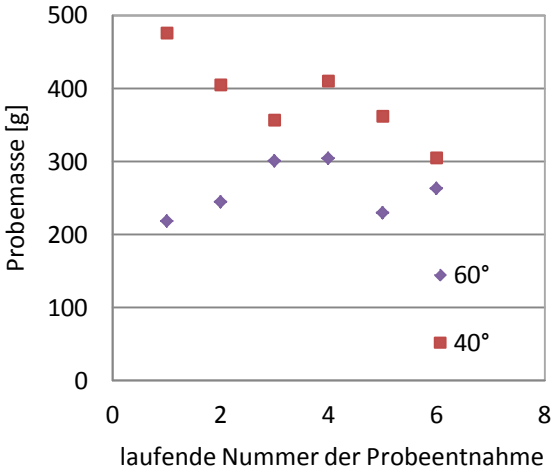


Abbildung 6: Einfluss der Klappenstellung auf die Probenmasse

Da die Probenmasse relativ stark variierte wurden für die Auswertung nur Mittelwerte verwendet

4.2 Einflussfaktoren des Konversionsprozesses auf die Probenahme

Wie schon erwähnt, beeinflusst auch der Bettzustand die Probenahme. Deshalb wurden der Strömungszustand und die Bettmasse auf ihren Einfluss hin untersucht, welcher in den folgenden Abbildungen. 7 und 8 dargestellt ist.

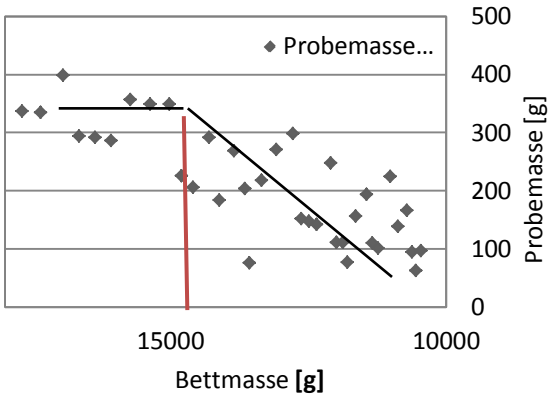


Abbildung 7: Einfluss der Bettmasse auf die Probenmasse

Wie die Grafik (Abb. 7) zeigt, ist oberhalb einer Bettmasse von 15 kg eine konstante Probenahme zwischen 300 - 400 g realisiert worden.

Unterhalb dieser Grenze nimmt die Probenmasse innerhalb einer großen Schwankungsbreite kontinuierlich ab. Dies kann mit der Abnahme der expandierten Betthöhe begründet werden. Die Masse der entnommenen Probe ist bei ausreichend dichtem Bett (Bettmasse über 15 kg) auch für verschiedene Fluidisationszustände der Wirbelschicht ($3 < f(u/u_{MF}) < 7$) im Rahmen der üblichen Schwankungsbreite konstant. (Abb.8)

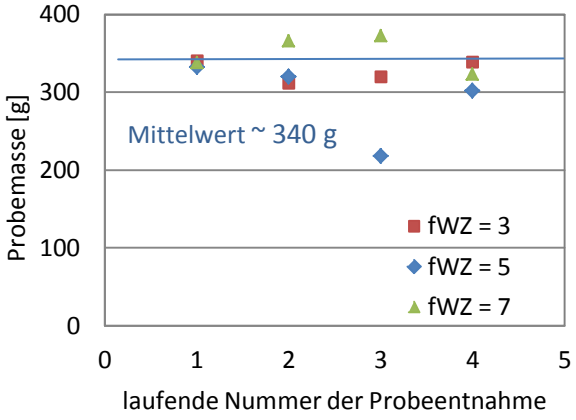


Abbildung 8: Einfluss typischer Wirbelschichtzustände fWZ (3 < u/uMF < 7) auf die Probenahme

5 Messung Partikelgrößenverteilung

Die Probenahme dient dem Ziel, eine Aussage über die Partikelgrößenverteilung der Brennstoffpartikel in Abhängigkeit vom Prozesszustand treffen zu können. Dazu müssen die entnommenen Proben einer Partikelgrößenanalyse unterzogen werden.

5.1 Problematik Mischprobe

Die Probe besteht zu 95 % aus inertem Bettmaterial (Quarzsand), dessen Größenverteilung nicht in das Ergebnis einfließen soll, und zu 5% aus dem teilweise abreagierten Brennstoff. Da sich die Verteilungen des Quarzsandes und der Partikel überlagern, können sie rechnerisch nicht eindeutig separiert werden. Die Sandpartikel müssen also von den Brennstoffpartikeln getrennt werden. Die bisher analysierten Proben wurden durch Sieben vom Sand getrennt. Dabei geht der Feinanteil der Brennstoffprobe verloren. Alle Partikel, die die Korngröße des Quarzsandes aufweisen oder kleiner sind, blieben also zunächst bei der Verteilungsmessung außen vor.

5.2 Optische Analyse

Die Messung von Partikelgrößenverteilungen kann auf unterschiedlichste Art und Weise geschehen. In diesem Fall wurde zur Bestimmung der Korngrößenverteilung ein Camsizer der Fa. Retsch verwendet, bei dem ein optisches Verfahren angewendet wird. Hier werden über Kameraaufzeichnung unter besonderen Lichtverhältnissen die Projektionsflächen der durch die Messeinheit fallenden Partikel aufgezeichnet und intern deren Sehnenlänge bestimmt. Unter vorgegebenen oder ebenfalls gemessenen Formangaben können daraus die Abmaße eines jeden Partikels errechnet werden.

5.3 Repräsentanz

Aufgrund des oben genannten sehr geringen Volumenanteils der Konversionspartikel stellt sich die Frage nach der Repräsentanz einer Probe von ca. 350 g. Um hier zu einer Aussage zu gelangen, wurden Verteilungen von Einzelproben mit der ihrer Summenprobe verglichen. Die folgenden Grafiken zeigen die Ergebnisse der Camsizeruntersuchungen für eine Einzelprobe und eine aus acht Einzelproben erstellte Summenprobe.

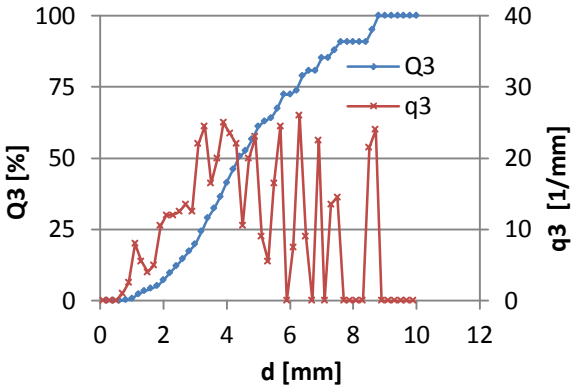


Abbildung 9: Partikelgrößenverteilung für Brennstoffpartikel einer Probe

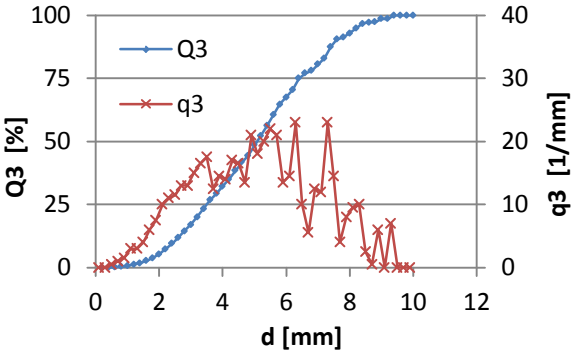


Abbildung 10: Partikelgrößenverteilung für Brennstoffpartikel von 8 Proben

Während die Einzelprobe sehr volatile Charakteristik aufweist, ist bei der achtfachen Beprobung schon eine deutliche Glättung der Verteilung q3 erkennbar.
Als Kriterium für die Probenrepräsentanz wurden zusätzlich Korngrößenklassen (d_{25}, d_{50}, d_{75}) der Einzelproben und der gemittelten Mehrfachproben bestimmt. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der Einzel- und gemittelten Mehrfachproben.

Probe	d_{25} [mm]	d_{50} [mm]	d_{75} [mm]
Einzel	2,9 – 4,2	4,2 – 5,8	5,4 – 7,4
Zweifach	3,2	4,3	5,8
Vierfach	3,4	5,1	6,5
Achtfach	3,6	5,3	6,9
16-fach	3,4	5,1	6,3

Tabelle 1: Mittelwerte charakteristischer Korngrößen

Aus dieser tabellarischen Darstellung lässt sich der in den Grafiken (Abb. 9 und 10) ersichtliche Effekt einer Glättung erkennen.

6 Fazit

6.1 Zusammenfassung

Durch experimentelle Untersuchungen konnten Betriebsparameter für ein Probenahmesystem bestimmt werden, mit denen es möglich, ist eine relativ konstante Probenmasse unter verschiedenen Prozessbedingungen zu generieren. Dafür wurden unter konstanten Betriebsbedingungen bei der Verbrennung von Holzpellets Proben aus dem Hochtemperaturbett in einer Wirbelschicht entnommen und mit Tockeneis gequenscht.
Die Proben wurden anschließend aufbereitet und einer Korngrößenanalyse in einem Camsizer unterzogen. Die Ergebnisse zeigen, dass repräsentative Proben, bestehend aus Bettmaterial (Sand) und teilweise umgesetzten Brennstoffpartikel mit diesem Probenahmesystem entnommen und analysiert werden können.

6.2 Ausblick

Aus den gezeigten Ergebnissen und dokumentierten Erfahrungen lassen sich weitere Untersuchungsziele ableiten. Die Trennung der Brennstoffpartikel vom Inertmaterial ist von besonderer Bedeutung für eine Probe, die das gesamte Spektrum der im Reaktor befindlichen Brennstoffpartikel repräsentieren soll. Das bisher vielversprechendste Trennungsverfahren, die Sichtung, soll in Kürze getestet werden. Durch den relativ großen Dichteunterschied wird hierin das größte Potential vermutet, um schnell und effizient zu trennen.

Auch Segregationseffekte, beschrieben bei Zhang [6], wie z.B. das Aufschwimmen großer Partikel im Bett, müssen untersucht werden um zu beurteilen, ob die Probenahme tatsächlich der Anforderung entspricht, das gesamte Bett zu repräsentieren.

7 Literatur

[1] F. Kretschmer, V.K. Surasani, A. Bück, M. Peglow, E. Tsotsas, Particle size dependent devolatilization kinetics of wood pel lets, 9./10. Forschungskolloquium am Fraunhofer IFF, 2010, 91-96

[2] Werther , Joachim: Measurement techniques in fluidized beds. Powder Tech nology 102 (1999) 15–36

[3] M. Lackner, G. Loeffler, G. Totschnig, F. Winter, H. Hofbauer: Carbon conversion of solid fuels in the freeboard of a laboratory-scale fluidized bed combustor — application of in situ laser spectroscopy. Fuel 83 (2004) 1289–1298

[4] T. Reichelt, H. Spliethoff, and K. R. G. Hein: In-situ determination of fuel particle reaction rates by simultaneous measurement of particle temperature and size. Chem. Eng. Technol. 22 (2000) 22-26

[5] Pulsed atmospheric fluidized bed combustion, Manufacturing and Technology Conversion International, Inc. DOE/MC/2506 9--2976, (1989) 28F.4, 17 - 18

[6] Zhang, Y; Jin B, Zhong, W: Fluidization, mixing and segregation of a biomass-sand mixture in a fluidized bed. International Journal of Chemical Reactor Engineering 6 (2008) Article A88

EMISSIONSHANDEL IM STRASSENGÜTERVERKEHR

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Alexander Kaiser
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Logistik und Materialflusstechnik

EMISSIONSHANDEL IM STRASSENGÜTERVERKEHR

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Alexander Kaiser, Institut für Logistik und Materialflusstechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

1 Problemstellung und Anlass für das Forschungsvorhaben

Das Problem der relativ hohen CO2-Emissionen im Straßengüterverkehr ist für die Transportdienstleister von zunehmender Bedeutung, da strengere Klimaschutzziele der Politik und nicht zuletzt eine zunehmende Nachhaltigkeitsorientierung der Kunden dazu zwingen, Transporte klimaschonender durchzuführen. Um das von der Klimaforschung empfohlene und auf der UN-Klimakonferenz 2010 in Cancún politisch vereinbarte Hauptziel zu erreichen, die Erderwärmung gegenüber der vorindustriellen Zeit auf 2 Grad zu begrenzen, sind die weltweiten CO2-Emissionen bis 2050 kontinuierlich um 50 bis 85 Prozent gegenüber dem Niveau von 2000 zu reduzieren [1].[1]

Um die international vereinbarten und als dringlich erachteten Klimaschutzziele auch nach dem Auslaufen des Kyoto-Protokolls (2012) weiterzuverfolgen, haben sich alle Staaten der Europäischen Union (EU) und vor allem Deutschland zu weitergehenden Reduktionsverpflichtungen bekannt: Bis 2020 will Deutschland seine Treibhausgas-Emissionen um 40 Prozent gegenüber 1990 reduzieren, während in der gesamten EU durchschnittlich 20 Prozent erreicht werden sollen. Mittelfristig wird in Deutschland sogar eine Reduktion um 55 Prozent bis 2030 und bis Mitte dieses Jahrhunderts um 80 bis 95 Prozent jeweils gegenüber 1990 angestrebt [2].

Davon wird auch der Verkehrssektor zukünftig nicht unberührt bleiben, da sein Anteil an den anthropogenen Treibhausgas-Emissionen weltweit rund 13 Prozent und in der Europäischen Union etwa 20 Prozent beträgt [1; 3]. In Deutschland wird besonders der Straßengüterverkehr mit einem gegenwärtigen Anteil von etwa fünf Prozent an den Gesamtemissionen zukünftig mehr zum CO2-Ausstoß beitragen. Da laut einer Modellrechnung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) bis 2030 ein Anstieg der Fahrleistung um etwa 69 Prozent gegenüber 2005 prognostiziert wird, steigen die CO2-Emissionen dementsprechend um 32 bis 50 Prozent an [4]. Obwohl dabei ein optimistisches Szenario für die Entwicklung und Marktdurchdringung energieeffizienter Antriebs- und Fahrzeugtechnik sowie von CO2-ärmeren Biokraftstoffen bereits angenommen wird, verdeutlicht die Modellrechnung die Begrenztheit des technischen Fortschritts, das CO2-Problem im Verkehrssektor zu lösen.

Dies ist darauf zurückzuführen, dass Diesel-Verbrennungsmotoren in Lkw auf absehbare Zeit nicht substituierbar und Biokraftstoffe in der erforderlichen Menge aufgrund weltweit begrenzter Anbauflächen zu wirtschaftlichen Preisen nicht verfügbar sind. Außerdem können sparsamere und CO2-ärmere Fahrzeuge - theoretisch - einen sogenannten Rebound-Effekt verursachen, bei dem die Nutzer aufgrund sinkender Kraftstoffkosten einen Anreiz erhalten, die Fahrleistung so auszudehnen, dass sich die absoluten CO2-Emissionen erhöhen [5]. Um diesen unbeabsichtigten Effekt zu vermeiden, müssten die Kraftstoffpreise dementsprechend erhöht werden.

Die oben beschriebene Problematik verdeutlicht, dass einzelne Unternehmen (hier: Fahrzeughersteller und Transportdienstleister) in ihrem Gestaltungsbereich zwar diverse CO2-Reduktionsmaßnahmen umsetzen können, dies aber aus der gesamtwirtschaftlichen Perspektive zu negativen Effekten führen kann. Daher ist ein übergeordneter, wirtschaftspolitischer Rahmen erforderlich, der die dezentrale Umsetzung von Maßnahmen durch einzelne Unternehmen auf einer zentralen Ebene koordiniert, so dass die Klimaschutzziele insgesamt erreicht werden.

2 Lösungsansatz zur Reduktion der CO2-Emissionen im Straßengüterverkehr

2.1 Umweltökonomische Instrumente

Eine entsprechende Koordination kann durch die klassischen Instrumente der Umweltpolitik (siehe Abbildung 1) auch im vergleichsweise jungen Anwendungsfeld der Klimapolitik geleistet werden, da ein Übermaß an CO2 einen negativen externen Effekt für das Klima darstellt. Da die Schadwirkung von CO2 jedoch im Unterschied zu den meist lokal (um eine Emissionsquelle) wirkenden Luftschadstoffen, wie z. B. Rußpartikel aus Diesel-Motoren, nicht räumlich begrenzt ist, muss entweder ein einziges klimapolitisches Instrument international angewendet werden oder einzelne, nationale Instrumente müssen sukzessive auf globaler Ebene vernetzt werden.

1 Das vom Menschen verursachte (anthropogene) CO2 ist mit einem Anteil von weltweit etwa 75 Prozent das bedeutendste Treibhausgas, das größtenteils bei der Verbrennung fossiler Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas entsteht [1]. Im Verkehrssektor beträgt der Anteil von CO2 bei der Verbrennung von Diesel und Benzin etwa 99 Prozent, weshalb im Folgenden die sogenannten CO2-Äquivalente (andere Treibhausgase wie CH4 und N2O) wegen ihrer geringfügigen Bedeutung nicht berücksichtigt werden [6].

Das letzte Szenario wird in langfristiger Perspektive vom Autor als realistisch erachtet und bildet daher den Anlass für die konkrete Planung eines klimapolitischen Instruments im Anwendungsgebiet des deutschen Straßengüterverkehrs, wobei dessen Übertragbarkeit auf die gesamte EU angestrebt wird.

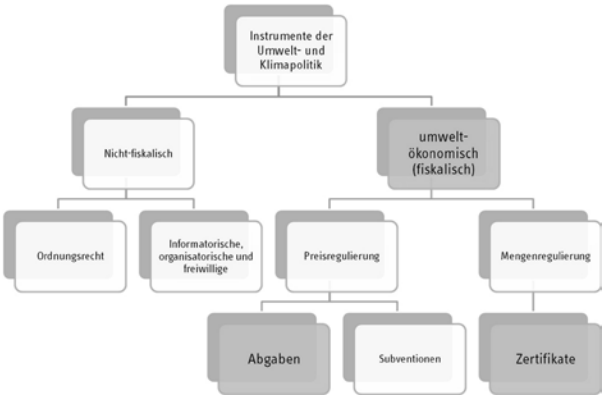


Abbildung 1: Einordnung von umweltökonomischen Instrumenten in die umwelt- und klimapolitischen Instrumente des Staates (eigene Darstellung in Anlehnung an [7])

Damit das klimapolitische Instrument die Unternehmen des Straßengüterverkehrs zielgerichtet koordiniert und zu einer optimalen Reduktion der CO2-Emissionen führt, hat es die zwei folgenden Grundbedingungen zu erfüllen:

- Die Einhaltung eines sektoralen CO2-Emissionsentwicklungspfads wird durch das Instrument langfristig garantiert (ökologische Treffsicherheit). Dieser wird aus dem nationalen CO2-Emissionsentwicklungspfad abgeleitet, welcher letztlich auf den internationalen Klimaschutzzielen basiert.[2]
- Die aus dem sektoralen CO2-Emissionsentwicklungspfad resultierende Reduktionsmenge ist zu den geringsten Kosten für den Straßengüterverkehrssektor zu realisieren (Kosteneffizienz).

Die zwei Grundbedingungen, die aus den klassischen Kriterien der Umweltökonomie abgeleitet sind [8], lassen sich noch um eine dritte Bedingung, die dynamische Anreizwirkung, ergänzen. Darunter wird grundsätzlich »die Fähigkeit eines Instruments verstanden, umwelttechnischen Fortschritt zu induzieren.« ([8] S. 121) Dieses Kriterium wird jedoch gegenüber den zwei Grundbedingungen als untergeordnet angesehen, da eine Bewertung der dynamischen Anreizwirkung nur möglich ist, wenn das klimapolitische Instrument direkt bei den Fahrzeug- und Kraftstoffherstellern ansetzt. Dadurch würde jedoch eine Vorfestlegung auf diese beiden Akteure erfolgen, wenn dieses Kriterium zwingend zu erfüllen ist. Demnach bildet die dynamische Anreizwirkung anstelle einer Grundbedingung ein Zielkriterium, das bei der Ausgestaltung des klimapolitischen Instruments zu optimieren ist. Auf eine ausführliche Bewertung der verschiedenen Instrumente wird hier verzichtet und im Allgemeinen auf [8; 9] sowie speziell für den Verkehrsbereich auf [5; 10] verwiesen.

Demnach lässt sich zusammenfassend feststellen, dass die umweltökonomischen Instrumente, insbesondere Abgaben und Zertifikate, gegenüber ordnungsrechtlichen Auflagen zur Erfüllung der zwei Grundbedingungen besser geeignet sind. Nur sie ermöglichen a priori Kosteneffizienz, da die Entscheidung über die Umsetzung einer CO2-Reduktionsmaßnahme dem einzelnen Akteur überlassen wird. Dieser verfügt in der Regel über die notwendigen Informationen zu Grenzvermeidungskosten und Vermeidungspotenzial von unterschiedlichen Maßnahmen innerhalb seines Gestaltungsbereichs. Unter der Annahme von ökonomisch rationalem Verhalten wird ein Akteur bestimmte, verfügbare CO2-Reduktionsmaßnahmen auswählen, womit eine vorgegebene Emissionsmenge zu den geringsten Kosten vermieden wird. Die ökologische Treffsicherheit des Emissionszielpfads kann zudem nur durch Zertifikate, insbesondere durch einen „Cap & Trade"-Emissionshandel, garantiert werden, da dieser eine verbindliche Obergrenze (Cap) für die gesamten CO2-Emissionen aller am Emissionshandel beteiligten Sektoren für eine bestimmte Periode festlegt. Daher wird der Emissionshandel als das am besten geeignete Instrument zur Lösung der Problemstellung ausgewählt.

2.2 Emissionshandel (Zertifikate)

Beim Emissionshandel wird durch limitierte, handelbare Eigentumsrechte (Zertifikate) der Ausstoß von umwelt- bzw. klimaschädlichen Emissionen in die Atmosphäre begrenzt. Dabei gibt ein Zertifikat dem Besitzer jeweils das Recht zum Ausstoß einer bestimmten Emissionsmenge, z. B. einer Tonne CO2. Über dieses Konstrukt wird ein bisher öffentliches Gut (nämlich die kostenlose Nutzung der Atmosphäre zur Entsorgung von CO2) zu einer knappen, wertvollen Ressource transformiert, sodass diese in das betriebswirtschaftliche Kalkül des Verursachers - gemäß dem Prinzip der Internalisierung externer Kosten - einbezogen wird. Der Preis für eine Mengeneinheit der Emission wird jedoch im Unterschied zur Abgabe nicht in fixer Höhe vom Staat bestimmt, sondern abhängig von Angebot und Nachfrage auf einem Zertifikatemarkt gebildet [9].

2 Die Festlegung des sektoralen CO2-Emissionsentwicklungspfads für den Straßengüterverkehr ist eine klima- und wirtschaftspolitische Fragestellung, die aus Sicht des Autors durch Verhandlungen zwischen den einzelnen Wirtschaftssektoren und der Politik zu klären ist und daher nicht in diesem Forschungsvorhaben behandelt wird. Stattdessen werden gegebene Entwicklungspfade für den deutschen Verkehrssektor verwendet, welche für den hier verfolgten Forschungszweck einer Wirkungsanalyse ausreichend sind.

In der EU existiert seit 2005 ein entsprechendes Emissionshandelssystem (EU-ETS) für Treibhausgase aus stationären Anlagen der Energiewirtschaft und energieintensiven Industrie und seit 2012 auch für die CO2-Emissionen des Luftverkehrs. Die Ausweitung des EU-ETS auf den Straßengüterverkehr wird bereits 2008 vom EU-Parlament gefordert [11]. Dies kann jedoch frühestens mit der nächsten Revision der EU-Emissionshandelsrichtlinie beschlossen werden, welche entweder nach Abschluss eines internationalen Klimaschutzabkommens oder spätestens im Jahr 2014 vorgesehen ist [12].

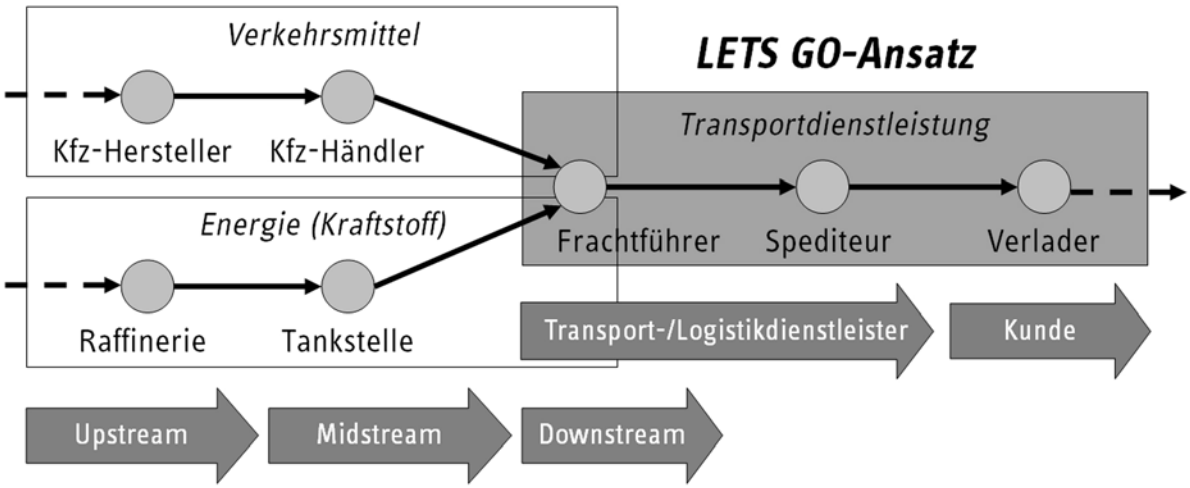


Abbildung 2: Ansatzpunkte für einen CO2-Emissionshandel im Straßengüterverkehr

Falls der CO2-Emissionshandel im Straßengüterverkehr eingeführt wird, sind die Akteure zu bestimmen, welche die Emissionen zu erfassen und Zertifikate nachzuweisen haben. Die dazu geeigneten Akteure sind vor allem der Frachtführer (Fahrzeughalter), welcher die CO2-Emissionen auf Basis des gemessenen Kraftstoffverbrauchs (ex post) ermittelt, oder der Kraftstofflieferant, welcher die CO2-Emissionen auf Basis der verkauften Kraftstoffmenge (ex ante) berechnet. Je nachdem, wo sich der Ansatzpunkt auf der Wertschöpfungskette befindet, wird zwischen Upstream-, Midstream- und Downstream-Ansatz unterschieden (siehe Abbildung 2) [13].

Die Unterscheidung bezieht sich ursprünglich nur auf die Energieflusskette, worin die Akteure der Verkehrsmittel- und -dienstleistungskette integriert sind [14]. Ein neues Verständnis der Ansatzpunkte erfolgt aufgrund eigener Vorarbeiten im Forschungsprojekt LETS GO [15] entsprechend der Darstellung in Abbildung 2. Darin verläuft die Wertschöpfungskette im Straßengüterverkehr aufgrund der Parallelität von Energie- und Verkehrsmittelkette konvergierend, so dass diese jeweils einen Upstream-, Midstream- und Downstream-Ansatz enthalten. Sie münden in die Transportdienstleistungskette, welche zwei unterschiedliche Akteursgruppen umfasst: den Transport- und Logistikdienstleister sowie den Kunden (Verlader). Der Transport- und Logistikdienstleister ist entweder ein Frachtführer, der einen Transportauftrag unmittelbar für einen Kunden ausführt, oder ein Akteurspaar aus Frachtführer und Spediteur, wobei letzterer den Transportauftrag für einen Kunden plant und an einen Frachtführer vermittelt. Der letztgenannte Fall trifft vor allem auf große Speditionen und Logistikdienstleister mit vielen Subunternehmen (Frachtführer) zu. Diese sind als Ansatzpunkt für den Emissionshandel besser geeignet als ihre Subunternehmen, da der administrative Mehraufwand aufgrund vorhandener Organisationsstrukturen nur geringfügig ansteigt [15].

2.3 Bewertung der Ansatzpunkte

Grundsätzlich unterscheiden sich die Ansatzpunkte hinsichtlich des Administrationsaufwands voneinander, da dieser mit der Anzahl von zu überwachenden Marktakteuren an-steigt [7]. Der Administrationsaufwand bildet die indirekten Kosten des Emissionshandels, da er nicht zu einer direkten Reduzierung der CO2-Emissionen beiträgt, aber trotzdem notwendig für die Funktionsfähigkeit des Emissionshandels ist. Im Folgenden wird dafür auch der Begriff »Transaktions-kosten« verwendet. Bei den nachweispflichtigen Unter-nehmen im EU-ETS umfassen die Transaktionskosten vor allem Aufwendungen für die:

- Erstellung eines Monitoring-Plans vor Beginn eines Berichtszeitraums durch einen externen Sachverständigen,
- Prüfung und Verifizierung des jährlichen Emissionsberichts durch einen externen Sachverständigen und
- Beschäftigung eines sachverständigen Mitarbeiters im eigenen Unternehmen, u. a. zur Erfassung und Dokumentation der CO2-Emissionen sowie zum Kauf und Verkauf von Zertifikaten [15].

Bei einem Downstream-Ansatz im Straßengüterverkehr betragen die durchschnittlichen Transaktionskosten für die Frachtführer zwischen 16 und 29 € pro t CO2. In Bezug auf die Transportkosten eines 40-t-Sattelzugs im Fernverkehr belaufen sich die Transaktionskosten durchschnittlich auf 1,1 bis 2,1 €-Cent/km. Die direkten Zertifikatekosten betragen bei einem langfristigen Durchschnittpreis von 15 € pro t CO2 dagegen nur ca. 1,06 €-Cent/km [15].

Obwohl die direkten Zertifikatekosten im Vergleich zur Lkw-Maut (15,5 €-Cent/km) und zur Diesel-Energiesteuer (ca. 12,7 €-Cent/km) eine relativ geringe Mehrbelastung darstellen, besteht eine große Diskrepanz von direkten und indirekten Emissionshandelskosten. Diese Diskrepanz ist im Wesentlichen auf zwei Gründe zurückzuführen [15]:

- Da die vielen kleinen und mittelgroßen Transportdienstleister im Straßengüterverkehr im Einzelnen relativ wenig CO2-Emissionen verursachen (Kleinemittenten), die fixen Transaktionskosten aber weitgehend größenunabhängig sind, ergeben sich zwangsläufig hohe indirekte Kosten pro t CO2 bzw. pro km.
- Der gegenwärtige Zertifikatepreis ist im Vergleich zum entsprechenden Diesel-Energiesteuer- bzw. Lkw-Mautsatz so gering, dass sich zwangsläufig eine Diskrepanz zu den fixen Kosten ergibt. Erst bei einem Preisniveau ab 200 € pro t CO2 verhalten sich die direkten und indirekten Kosten analog zur Lkw-Maut. Andererseits wird eine hohe Kosteneffizienz des Emissionshandels nur gewährleistet, wenn der Zertifikate-preis minimiert wird und sich an den momentan günstigsten Grenzvermeidungskosten in allen Sektoren des EU-ETS orientiert. Daher ist die Überlegung zu einem möglichen Mindestpreis für Emissionszertifikate keine adäquate Lösung dieses Diskrepanzproblems.

Der Downstream-Ansatz ermöglicht den Transportdienstleistern auch keine zusätzlichen Gewinne durch den Verkauf überschüssiger Zertifikate, da die Grenzvermeidungskosten des Straßengüterverkehrs im Durchschnitt ca. 140 € pro t CO2 betragen und damit über der gegenwärtigen Zertifikatepreisspanne von 7 bis 15 € pro t CO2 liegen [16]. Demnach werden die Transportdienstleister selbst keine CO2-Emissionen vermeiden und stattdessen zusätzliche Zertifikate beschaffen. Da im gesamten Straßengüterverkehr voraussichtlich keine überschüssigen Zertifikate verkauft werden können, ist die Wirkung prinzipiell mit einer CO2-Steuer auf den Kraftstoffverbrauch vergleichbar. Dem-zufolge ist anstelle des Downstream-Ansatzes entweder ein CO2-Anteil in der bestehenden Kraftstoffsteuer oder ein Upstream-Emissionshandel auf Ebene der Mineralölkonzerne (Kraftstoffanbieter) einzuführen.

Aufgrund der fehlenden ökologischen Treffsicherheit einer Steuer (vgl. Abschnitt 2.1) wird im Forschungsvorhaben nur der Upstream-Ansatz weiterverfolgt.

Aus der Perspektive des gesamten Verkehrssektors existiert bereits ein Upstream-Emissionshandel für die elektrische Energie im Schienenverkehr, welche das Pendant zu den Kraftstoffen im Straßenverkehr bildet. Daher ist ein Upstream-Ansatz für alle flüssigen Kraftstoffe im Verkehrssektor besonders aus der Perspektive von Schienenverkehrsunternehmen die konsequenteste Lösung, da neben der elektrischen auch die Diesel-Traktion in das EU-ETS integriert wird. Außerdem können durch den Upstream-Ansatz auch neue Kraftstoffsorten (z. B. Wasserstoff) leicht in das EU-ETS integriert werden.

Durch den Upstream-Ansatz sind darüber hinaus alle verfügbaren Energie-Input-Faktoren von Verkehrsmitteln (Benzin, Diesel, Autogas, Schweröl, elektrischer Strom) auf den Verkehrsträgern Straße, Schiene und Binnenschifffahrt in das EU-ETS integrierbar. Die Kraftstoffe von Flugzeugen werden hierbei ausgenommen, weil der Luftverkehr bereits über einen Downstream-Ansatz erfasst wird. Da der Preis von allen Energie-Input-Faktoren demnach einen dem jeweiligen Emissionsfaktor entsprechenden CO2-Kostenanteil enthält, welcher wiederum auf dem einheitlichen Zertifikatemarktpreis des EU-ETS basiert, herrschen gleiche Wettbewerbsbedingungen zwischen den Verkehrsträgern im Personen- und Güterverkehr.

3 Forschungsziele und Lösungsweg

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die Wirksamkeit eines Upstream-Emissionshandels zur Reduktion der CO2-Emissionen im Straßengüterverkehr mithilfe eines Simulationsmodells zu untersuchen. Dabei besteht der innovative Beitrag darin, dass der positive Einfluss von unterstützen-den Planungswerkzeugen für Transportdienstleister in der Wirkungsanalyse berücksichtigt wird. Die zu entwickelnden Planungswerkzeuge sollen:

- bei der Entscheidung zur Umsetzung von CO2-Reduktionsmaßnahmen unterstützen (mithilfe einer Grenzvermeidungskostenrechnung) sowie
- eine transparente Berechnung und verursachungsgerechte Zuordnung der CO2-Emissionskosten ermöglichen (mithilfe einer CO2-Transportkostenrechung).

Das Konzept zur Erreichung der angestrebten Forschungsziele wird durch das folgende Schema beschrieben, welches das gesamte Untersuchungssystem des Forschungsvorhabens umfasst (siehe Abbildung 3).

3.1 Konzepterstellung für einen Upstream-Emissionshandel

Zuerst ist ein grundlegendes Konzept für die Aufbau- und Ablauforganisation (Emissionserfassung, Monitoring, Zertifikatenachweis, Erstzuteilung) und die Integration in das bestehende EU-ETS zu erstellen. Durch das Konzept wird die prinzipielle Funktionsweise beschrieben, die zur an-schließenden Erstellung des Simulationsmodells benötigt wird.

Daneben wird auch die Kraftstoffsteuer berücksichtigt, da die Besteuerung zukünftig am Energie- und CO2-Gehalt von Diesel- bzw. Benzinkraftstoffen bemessen wird [18]. Dadurch wird über das Preissignal eine zusätzliche CO2-Lenkungswirkung entstehen, welche bei der Wirkungsanalyse des Emissionshandels zu berücksichtigen ist. Grundsätzlich wird die Funktionsweise der beiden Lenkungsinstrumente durch eine Interaktion nicht eingeschränkt [19].

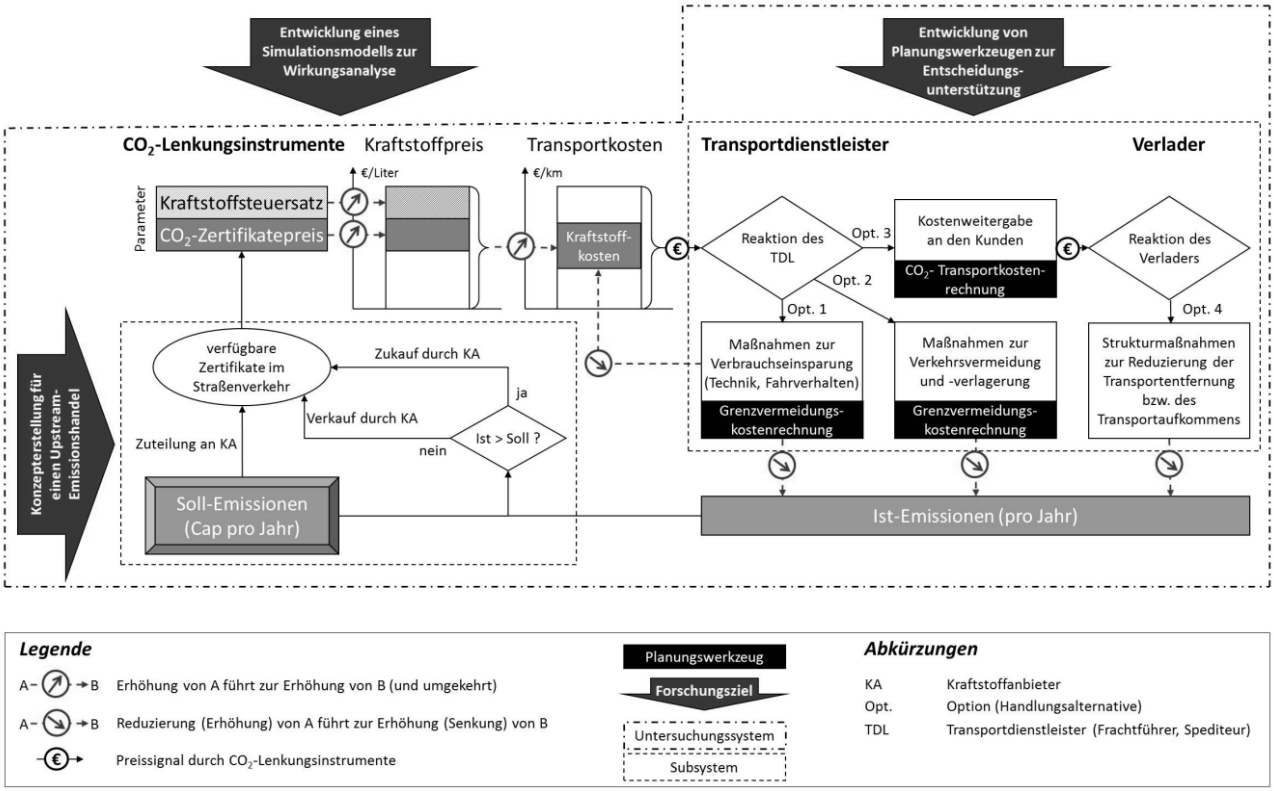


Abbildung 3: Konzept zur Integration von unterstützenden Planungswerkzeugen für Transportdienstleister im Rahmen eines Upstream-Emissionshandels im Straßengüterverkehr

Der Aufbau und die Funktionsweise werden im Subsystem auf der linken Seite von Abbildung 3 skizziert. Dabei werden die Zertifikatekosten der Kraftstoffanbieter in die Brutto-Kraftstoffpreise einkalkuliert. Eine Erfassung der direkten CO2-Emissionen durch den Transportdienstleister ist demnach nicht erforderlich, da die gesamten CO2-Emissionen bereits im Voraus über die im Straßenverkehr abgesetzte Kraftstoffmenge begrenzt werden, so dass die ökologische Treffsicherheit gewährleistet wird. Überschreiten die CO2-Emissionen das Cap, muss die entsprechende Differenz von den Kraftstoffanbietern durch den Zukauf von Zertifikaten kompensiert werden. Alternativ ist eine Cap-Überschreitung vermeidbar, indem entweder der Anteil von CO2-emissionsärmeren Kraftstoffstoffen (z. B. Biodiesel) im Voraus erhöht wird oder die Kraftstoffnachfrage der Kfz-Nutzer durch Preiserhöhungen verringert wird [17].

Unter der Annahme, dass die gesamte Emissionsmenge bereits durch das Cap beschränkt wird, passt sich der CO2-Zertifikatepreis so an, dass die Summe aus fixem Steuersatz und variablem Preis stets gleich bleibt. Demzufolge führen Kraftstoffsteuer und Emissionshandel - theoretisch - zu keiner Doppelbelastung der Transportdienstleister [19]. Diese und andere Hypothesen sind mithilfe des zu entwickelnden Simulationsmodells überprüfbar.

3.2 Entwicklung eines Simulationsmodells zur Wirkungsanalyse

Das Simulationsmodell wird das gesamte Untersuchungssystem abbilden (siehe Abbildung 3). Darin bildet das durch die Planungswerkzeuge unterstützte Entscheidungsverhalten der Transportdienstleister ein eigenständiges Teilmodell, das auf einem hohen Detaillierungsgrad

auf Unternehmensebene erstellt wird (mikroskopisches Modell). Das Teilmodell des Upstream-Emissionshandels lässt sich dagegen auf einem höheren Abstraktionsniveau abbilden, da hier die gesamtwirtschaftlichen Beziehungen und Wechselwirkungen von z. B. Geld-, Zertifikate- und Emissionsströmen von Interesse sind (makroskopisches Modell).

Für die Simulation von Güterverkehrssystem werden in der Literatur u. a. Multiagentenmodelle für die mikro- und mesoskopische Ebene sowie systemdynamische Modelle für die makroskopische Ebene beschrieben. In einem Multiagentenmodell steht die adäquate Abbildung des menschlichen Verhaltens im Vordergrund. Deshalb eignen sie sich besonders für die Analyse des Entscheidungsverhaltens bei begrenzter Rationalität, verzerrter Wahrnehmung oder unzureichend verfügbaren Informationen des Entscheidungsträgers [17].

Bei Jochem [17] wird ein Multiagenten-modell des deutschen Straßenverkehrs entwickelt, um die Auswirkungen eines CO2-Emissionszertifikatehandels auf private Autofahrer und gewerbliche Transportdienstleister im Straßengüterverkehr sowie die mögliche Entwicklung des Zertifikatepreises zu simulieren. Die Ergebnisse der Multiagentensimulation werden anschließend in ein System-Dynamics-Modell übertragen, um die makroökonomischen Effekte auf ausgewählte Emittentengruppen zu simulieren.

4 Fazit und Ausblick

Das beschriebene Forschungsvorhaben verfolgt drei Ziele. Erstes Ziel ist die Erstellung eines Konzepts für einen Upstream-Emissionshandel im Straßengüterverkehr. Dadurch werden die CO2-Emissionen über das Kraftstoffangebot durch ein zentrales, koordinierendes Instrument gelenkt (ökologische Treffsicherheit). Durch die Zukaufsmöglichkeit von Zertifikaten aus dem EU-ETS wird das Kraftstoffangebot jedoch nicht begrenzt. Vielmehr werden über dem Cap liegende CO2-Emissionen dort kompensiert, wo die Grenz-vermeidungskosten günstiger sind (Kosteneffizienz). Zweites Ziel - und der innovative Beitrag des Forschungs-vorhabens - ist die Entwicklung von Planungswerkzeugen, die ebenso im Simulationsmodell abgebildet werden, um deren unterstützende Wirkung für die Transportdienstleister im Fall des Emissionshandels untersuchen und bewerten zu können. Drittes Ziel ist die Entwicklung eines Simulationsmodells zur Analyse des Upstream-Emissionshandels. Aufgrund der verschiedenen Detaillierungsgrade der Teilmodelle ist die Frage der anzuwendenden Simulationsmethode (System Dynamics, Multiagentensimulation) im Vorfeld umfassend zu untersuchen.

5 Literatur

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.): Climate Change 2007: Synthesis Report: Summary for Policymakers. 2007

[2] In URL: http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2010/10/2010-10-01-energiekonzept-bt.html. Stand: 30. März 2012

[3] Europäische Kommission (Hrsg.): EU energy and transport in figures: Statistical Pocketbook. Luxemburg, 2010

[4] Knitschky, G., Lischke, A., Müller, S., 2011, Entwicklung der Nutzfahrzeugflotte und deren CO2-Emissionen im Straßengüterverkehr in Deutschland bis zum Jahr 2030. In: Clausen, U. (Hrsg.): Wirtschaftsverkehr 2011: Modelle - Strategien – Nachhaltigkeit. Verlag Praxiswissen, Dort-mund, S. 139-155

[5] Meyer, G.: Analyse und technisch-ökonomische Bewertung von Gesetzesfolgen im Individualverkehr: dargestellt am Beispiel der Automobilindustrie Japans und Deutsch-lands: Dissertation. Braunschweig: Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2009

[6] Kranke, A.: So ermitteln Sie den CO2-Footprint. In: VerkehrsRundschau (2009), 42, S. 20-23

[7] Lambrecht et al.: Flexible Instrumente der Klimapolitik im Verkehrsbereich: Weiterentwicklung und Bewertung von konkreten Ansätzen zur Integration des Verkehrssektors in ein CO2-Emissionshandelssystem: Endbericht. Heidelberg, Mannheim, Frankfurt, Berlin, 2003

[8] Endres, A.: Umweltökonomie: 2. Auflage. Stuttgart, Berlin, Köln: Kohlhammer-Verlag, 2000

[9] Weimann, J.: Umweltökonomik: 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1991

[10] Küster, R., Ellersdorfer, I., Voß, A.: CO2-Emissionshandel für Primärenergiemärkte: Eine Alternative zur Instrumentenvielfalt im Klimaschutz am Beispiel des Verkehrssektors. Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, 2008

[11] Europäisches Parlament: EU Emission Trading Scheme: use permit revenues to fund climate change protection, says Environment Committee: Pressemitteilung vom 7.10.2008. In: URL: http://www.europarl.europa.eu. Stand: 8. November 2010

[12] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung: Emissionshandel und Joint Implementation als Beiträge zu einer nachhaltigen Verkehrsentwicklung: Arbeitspapier. Köln, 2011

[13] Diaz-Bone et al.: Flexible Instrumente der Klimapolitik im Verkehrsbereich: Ergebnisbericht der Vorstudie. Hedelberg, Mannheim, Stuttgart, 2001

[14] Stronzik, M., Bühler, G., Lambrecht, U.: Ansatzpunkte für einen Emissionshandel im Verkehrssektor. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft 26 (2002), 3, S. 193-208

[15] Kaiser et al.: Konzept für die Einbeziehung der Gütertransporte auf der Straße in den Treibhausgas-Emissionszertifikatehandel der Europäischen Union (EU-ETS): LETS GO - Logistics Emissions Trading System for Green Optimization: Schlussbericht. Magdeburg: Institut für Logistik und Materialflusstechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2012

[16] Schreyer et al.: External Costs of Transport: Update Study: Final Report. Zürich, Karlsruhe, 2004

[17] Jochem, Patrick: A CO2-Emission Trading Scheme for German Road Transport: Dissertation. Baden-Baden: Nomos, 2009

[18] Europäische Kommission: Vorschlag für eine Richtlinie des Rates zur Änderung der Richtlinie 2003/96/EG zur Restrukturierung der gemeinschaftlichen Rahmenvorschriften zur Besteuerung von Energieerzeugnissen und elektrischem Strom, KOM(2011) 169/3, Brüssel, 2011

[19] Heilmann, S.: Abgaben- und Mengenlösungen im Klimaschutz: Die Interaktion von europäischem Emissionshandel und deutscher Ökosteuer. Köln: Finanzwirtschaftliches Forschungsinstitut an der Universität zu Köln, 2005 (Finanzwissenschaftliche Diskussionsbeiträge Nr. 05-2)

SARDAS – SIMULINK FRAMEWORK FÜR DIE ENTWICKLUNG VON INTELLIGENTEN SENSOREN

Dipl.-Inf. Tino Brade
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Verteilte Systeme

Dr. Sebastian Zug
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Verteilte Systeme

Prof. Jörg Kaiser
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Verteilte Systeme

SARDAS – SIMULINK FRAMEWORK FÜR DIE ENTWICKLUNG VON INTELLIGENTEN SENSOREN

Dipl.-Inf. Tino Brade, Dr. Sebastian Zug, Prof. Jörg Kaiser, Institut für Verteilte Systeme,
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

1 Motivation

Simulink ist eine Entwicklungsumgebung für die Simulation und modellgetriebene Entwicklung von dynamischen Systemen. Die reichhaltige Bibliothek von Simulink sorgt mit hinterlegten Gerätetreibern, Filterfunktionen, Verifikations- und Validierungstechniken für die Einstufung als Defacto-Standard im Bereich der Ingenieurbranche.

Im Rahmen der Entwicklung müssen die Speicherstrukturen, Gerätetreiber sowie Compilerkonfigurationen in Abhängigkeit von der Zielplattform festgelegt werden. Durch diese Maßnahmen ist das Simulink Modell an eine spezifische Zielplattform gebunden. Der typische Entwicklungsprozess von technischen Systemen verlangt neben einer spezifischen Zielplattform nach Simulationen sowie SiL/HiL Praktiken. Die Berücksichtigung von Simulation und SiL/HiL Praktiken erfordert in Simulink manuelle Modifikationen.

Im Rahmen dieser Modifikationen muss der Entwicklungsingenieur in Abhängigkeit der gewünschten Zielplattform die Gerätetreiber im Modell platzieren sowie konfigurieren und die Signalaufbereitung dieser Zielplattform berücksichtigen. Die resultierende Komplexität dieser Modifikationen kann zu schwerwiegenden Entwicklungsfehlern führen.

Eine Lösung der vorgestellten Problematik verspricht das Konzept der Model Driven Architecture (MDA). MDA trennt die Anwendung von der Technologie und bietet eine Modelltransformation für die Berücksichtigung verschiedener Modellebenen. SardaS überträgt die Vorteile von MDA auf Simulink mit einer Beschreibung sowie Modell-zu-Modell Transformation. Die Beschreibung kapselt die Heterogenität der Komponenten (Sensorik, Signalverarbeitung, Zielplattform und Kommunikation). Mit der Modell-zu-Modell Transformation werden die anfallenden Modifikationen automatisiert. Integrierte Überwachungsmechanismen gewährleisten die Korrektheit eines Simulink Modells im Rahmen einer Modelltransformation. Am Beispiel von intelligenten Sensoren wird der Entwicklungsprozess von SardaS vorgestellt.

2 Einleitung

Intelligente Sensoren sind in unserer Zeit allgegenwärtig und decken ein breites Anwendungsspektrum von der Temperaturmessung über die Positionserfassung (GPS) bis hin zur Smart-Kamera für eine Mustererkennung ab. Ein intelligenter Sensor setzt sich aus der Sensorik, Signalverarbeitung, Verarbeitungseinheit (Zielplattform) und Kommunikationsschnittstelle zusammen. Für ein intelligentes Verhalten in Form eines „Selbst-Test“, „Selbst-Adaption“ und „Selbst- Identifikation“ sorgt die Verarbeitungseinheit mit einer hinterlegten Anwendung. [1]

Demzufolge bedingt die Entwicklung eines intelligenten Sensors die Auswahl geeigneter Bestandteile und die Festlegung des Verhaltens. Im nachfolgenden Schritt ist die Interaktion zwischen den ausgewählten Bestandteilen festzulegen und diese Auswahl auf Kompatibilität zu prüfen. Der Kompatibilitätsanalyse schließt sich die Anwendungsentwicklung mit dem Auslesen von Messwerten, die Interpretation dieser Messwerte und die Entwicklung der Anwendungsfunktionalität an. Gerätetreiber gewähren den Zugriff auf die Schnittstellen der Verarbeitungseinheit und ermöglichen das Auslesen der Messwerte. Für die Verwendbarkeit der ausgelesenen Messwerte sind die Sensorspezifischen Eigenheiten durch eine:

- Kennlinienlinearisierung,
- Kompensation von Drift und Offset,
- Kalibrierung,
- Rauschunterdrückung usw.

in eine interpretierbare Darstellung zu überführen. Die aufbereiteten Messwerte dienen als Eingabe für die eigentliche Anwendung. Im Rahmen der Anwendung können die Messwerte der Sensorik beispielsweise für eine Sensorfusion verwendet werden. Der Einsatz von Simulationen, SiL und HiL Praktiken sind bei der Entwicklung eines komplexen Anwendungsverhaltens hilfreich.

Das vorliegende Paper untergliedert sich in die Vorstellung verwandter Arbeiten sowie der Erläuterung des Konzepts von SardaS mit einer anschließenden Zusammenfassung.

3 Verwandte Arbeiten

Das Ziel von SardaS besteht in der Ausnutzung der Merkmale von MDA für den Entwicklungsprozess in Simulink. MDA [2] strukturiert den Entwicklungsverlauf in verschiedene Modellebenen und definiert Transformation zwischen diesen Ebenen. In der Abbildung 1 sind die Plattformunabhängige Modellebene (PIM), die Plattformspezifische Modellebene (PSM) und die Implementationsspezifische Darstellung (ISM) visualisiert. Die Pfeile zwischen diesen Modellebenen repräsentieren mögliche Modelltransformation. Das Konzept der Modellkapselung sowie der Modelltransformation vermag auf der Ebene von PSM verschiedene Plattformen (Zielplattform, SiL, HiL) in der Entwicklung zu berücksichtigen. Die ISM Darstellung erlaubt in Abhängigkeit einer Plattform den Ausführungskontext (Simulation, Programmcode) zu wählen.

Für die Anwendung von MDA auf die Modellierungstechniken von Simulink ist die Kapselung der einzelnen Bestandteile eines intelligenten Sensors in Form einer Beschreibung vorzunehmen und die Transformation zwischen den vorgestellten Modellebenen zu ermöglichen. Die Arbeiten Sensor ML, IEEE 1451 und OMG STI präsentieren Beschreibungstechniken für die Kapselung der Bestandteile. Mit Cypress Express und Mathworks Simulink werden Entwicklungsumgebung mit einer integrierten Modelltransformation vorgestellt.

Sensor ML [3] ermöglicht die Schnittstellenbeschreibung von Sensorsystemen. Der Einsatz von Schnittstellenparametern verleiht Sensor ML eine Flexibilität zur Beschreibung von intelligenten Sensoren. Als Problematisch stellt sich diese Flexibilität im Kontext einer zukünftigen Modelltransformation heraus, weil Sensor ML kein Konzept zur eineindeutigen Schnittstellenbeschreibung aufweisen kann. Eine vermeintlich identische Schnittstelle kann aufgrund der flexiblen Schnittstellenparameter in unterschiedlichen Beschreibungen eine unterschiedliche Struktur aufweisen.

Im Gegensatz zu Sensor ML besitzen die standardisierten Schnittstellenbeschreibungen von IEEE 1451 [4] und OMG STI [5] eine interoperable Darstellung. Der Nachteil dieser Standardisierung beruht in der eingeschränkten Erweiterbarkeit und Flexibilität. Die Heterogenität von intelligenten Sensoren können einzelne Standardisierungen nicht abdecken. IEEE 1451 fokussiert ausschließlich die Anbindung der Sensorik (STIM)an die Verarbeitungseinheit (NCAP). Die Interaktion zwischen Verarbeitungseinheit und Kommunikation steht bei OMG STI im Mittelpunkt. Für die Beschreibung der Bestandteile eines intelligenten Sensors unter Berücksichtigung einer anschließenden Modelltransformation wäre eine Kombination aus den vorgestellten Beschreibungsformen (Sensor ML, IEEE 1451 und OMG STI) wünschenswert.

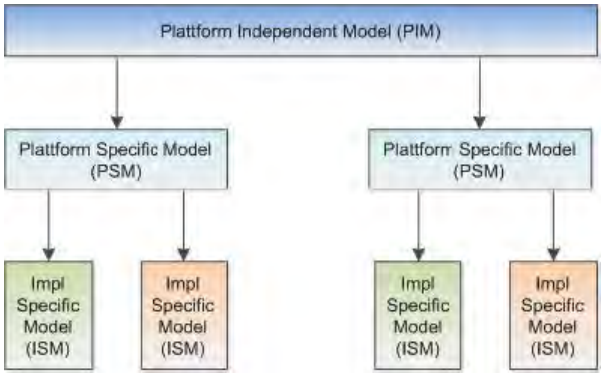

Plattform Independent Model (PIM)
Plattform Specific Model (PSM)
Plattform Specific Model (PSM)
Impl Specific Model (ISM)
Impl Specific Model (ISM)
Impl Specific Model (ISM)
Impl Specific Model (ISM)

Abbildung 1: Ebenen der Model Driven Architecture

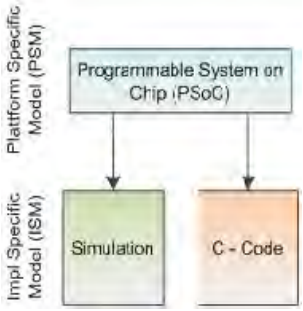


Abbildung 2: Modellebenen von Cypress Express

Cypress Express [6] ist eine Entwicklungsumgebung für eingebettete Systeme. In einer Bibliothek sind Sensoren sowie Aktuatoren hinterlegt, welche mit einer Simulationsfähigkeit aufwarten und konfigurierte Gerätetreiber mitbringen. Die Anwendungsentwicklung erfolgt in einer Plattformabhängigen Modellierung, welche ausschließlich die PSoC Serie von Cypress unterstützt. Ausgehend von dieser Plattformspezifischen Modelldarstellung (PSM) lässt sich die entwickelte Anwendung simulieren. Der integrierte Code Generator ermöglicht die Transformation der Modelldarstellung in C-Programmcode und stellt die benötigten Gerätetreiber sowie Interpretation der Messwerte transparent zur Verfügung.

Die beschriebene Transformation zwischen der Plattformspezifischen Modelldarstellung und der Simulation sowie Programmcode (C-Code) in Form einer ISM sind in der Abbildung 2 dargestellt. Der Vorteil von Cypress Express besteht in der Modelltransformation zur Berücksichtigung des Ausführungskontext (Simulation, C-Code), welcher bei der Entwicklung von intelligenten Sensoren benötigt wird. Cypress Express fokussiert ausschließlich die PSoC Plattform und ermöglicht neben der Simulation keine SiL oder HiL Praktiken. Aufgrund dieser Plattformabhängigkeit lässt sich dieses Entwicklungstool nicht für die Entwicklung von intelligenten Sensoren empfehlen.
Mathworks Simulink [7] ist eine modellgetriebene Entwicklungsumgebung zur Simulation dynamischer Systeme. In Simulink wird das Verhalten in einer Plattformunabhängigen Darstellung (PIM) modelliert. Diese Darstellungsform ist direkt Simulationsfähig.

Die Abbildung 3 visualisiert den beschriebenen Sachverhalt mit einer Transition von der Anwendung (PIM) bis hin zur Simulation (ISM) über den PC als Plattform (PSM). Der Einsatz von Simulink zur Entwicklung von technischen Systemen erfordert Plattformspezifische Gerätetreiber und die Interpretation von Messwerten. Simulink unterstützt die Plattformspezifische Darstellung durch die Bereitstellung entsprechender Gerätetreiber aus Bibliotheken. In der Abbildung 3 sind der Mikrocontroller Atmel AVR als Zielplattform sowie das xPC-Target für die HiL Szenarien dargestellt. Der Code Generator von Simulink ermöglicht ein Plattformspezifisches Modell (PSM) in eine ausführbare Darstellung (ISM) automatisiert zu überführen.

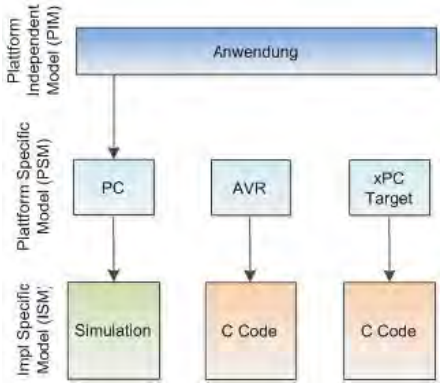


Abbildung 3: Modellebenen von Mathworks Simulink

Diese Automatisierung lässt sich in der Abbildung 3 in Form einer Transition zwischen PSM und ISM wiederfinden. Für die Überführung der Anwendung (PIM) in einer Plattformspezifische Darstellung (PSM) ist die Interpretation der eingelesenen Messwerte vorzunehmen. An dieser Stelle liefert Simulink keine automatisierten Mechanismen und vertraut auf den Entwicklungsingenieur. Demnach sind in der Abbildung 3 keine Transitionen zwischen Anwendung und Zielplattform (AVR) oder HiL (xPC-Target) eingezeichnet. Die Funktionsvielfalt von Simulink kann neben der Entwicklung für eine spezifische Zielplattform auch alternative Plattformen (HiL) berücksichtigen. Simulink bedient außerdem die Anforderung nach einem varianten Ausführungskontext (Simulation, C-Code). Als Problematisch stellt sich die Kombination aus unterschiedlichen Plattformen und dem varianten Ausführungskontext heraus. An dieser Stelle überlässt Simulink die notwendigen Aufgaben zur Transformation zwischen den verschiedenen Modellebenen dem Entwicklungsingenieur und bietet keine Mechanismen zur Überprüfung der durchgeführten Modifikationen.

4 Konzept

SardaS ist eine Erweiterung für Simulink zur Strukturierung des Entwicklungsprozesses in Modellebenen. Das Framework von SardaS besteht aus einem Modellgenerator, welcher auf Grundlage einer Komponentenbeschreibung arbeitet. Dieser Modellgenerator automatisiert die Modelltransformation zwischen einer Plattformunabhängigen (PIM) und der Plattformspezifische Darstellung (PSM) sowie zwischen verschiedenen Plattformabhängigen Darstellung (PSM). Die Modelltransformationen von SardaS sind in der Abbildung 4 mit rot eingefärbten Verbindungspfeilen dargestellt. Schwarze Verbindungspfeile kennzeichnen die Standardfunktionalität von Simulink.

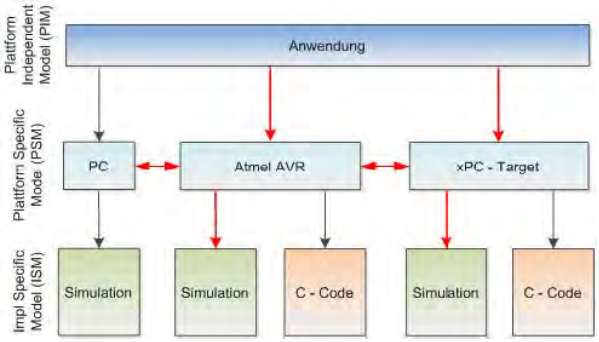


Abbildung 4: Modellebenen von SardaS

Der Einsatz von SardaS erfordert die Entwicklungsschritte Beschreibung, Spezifikation und Modellierung. Im Rahmen der Beschreibung werden die einzelnen Bestandteile (Sensorik, Signalverarbeitung, Verarbeitungseinheit, Kommunikation) eines intelligenten Sensors beschrieben. Die Spezifikation dient der Beschreibung einer speziellen Plattform. Eine Plattform setzt sich aus einzelnen Bestandteilen zusammen und definiert sich über die Interaktion zwischen Bestandteilen sowie deren Konfiguration. Mit dem Wissen über eine konkrete Plattform kann eine Plattformunabhängige (PIM) in eine Plattformspezifische Darstellung (PSM) mit dem Modellgenerator überführt werden. In der Modellierung findet die eigentliche Entwicklung des intelligenten Sensors mit der Transformation von PIM in PSM und PSM in ISM statt. Die Abbildung 5 visualisiert das Zusammenspiel der einzelnen Entwicklungsphasen. Im Nachfolgenden werden die einzelnen Entwicklungsphasen von SardaS beschrieben.

5 Beschreibung

Die Beschreibung erfasst den Informationsgehalt einzelner Bestandteile (Sensorik, Signalverarbeitung, Verarbeitungseinheit, Kommunikation) und strukturiert sich in die Schnittstellenbeschreibung sowie funktionaler und nichtfunktionaler Charakteristika.

In der Abbildung 5 ist dieser Entwicklungsschritt mit der Nummerierung Eins gekennzeichnet. In die Schnittstellenbeschreibung fließen die Ein- und Ausgänge eines Bestandteiles unter Verwendung eines eineindeutigen Schnittstellentyps ein. Eine Menge von Schnittstellenparametern beschreibt die Eigenschaften einer Schnittstelle.

Mit der Beschreibung einer Schnittstelle wird eine Menge von Schnittstellenparametern an einen Schnittstellentyp gebunden. Diese Beschreibung vereint die benötigte Flexibilität für die Beschreibung homogener Bestandteile mit der Widerspruchsfreiheit für die Modelltransformation.

überprüft. Aus einer Spezifikation resultiert eine plattformspezifische Beschreibung für die automatisierte Modelltransformation einer Plattformunabhängigen Modelldarstellung (PIM) in eine Plattformspezifische Darstellungsform (PSM).

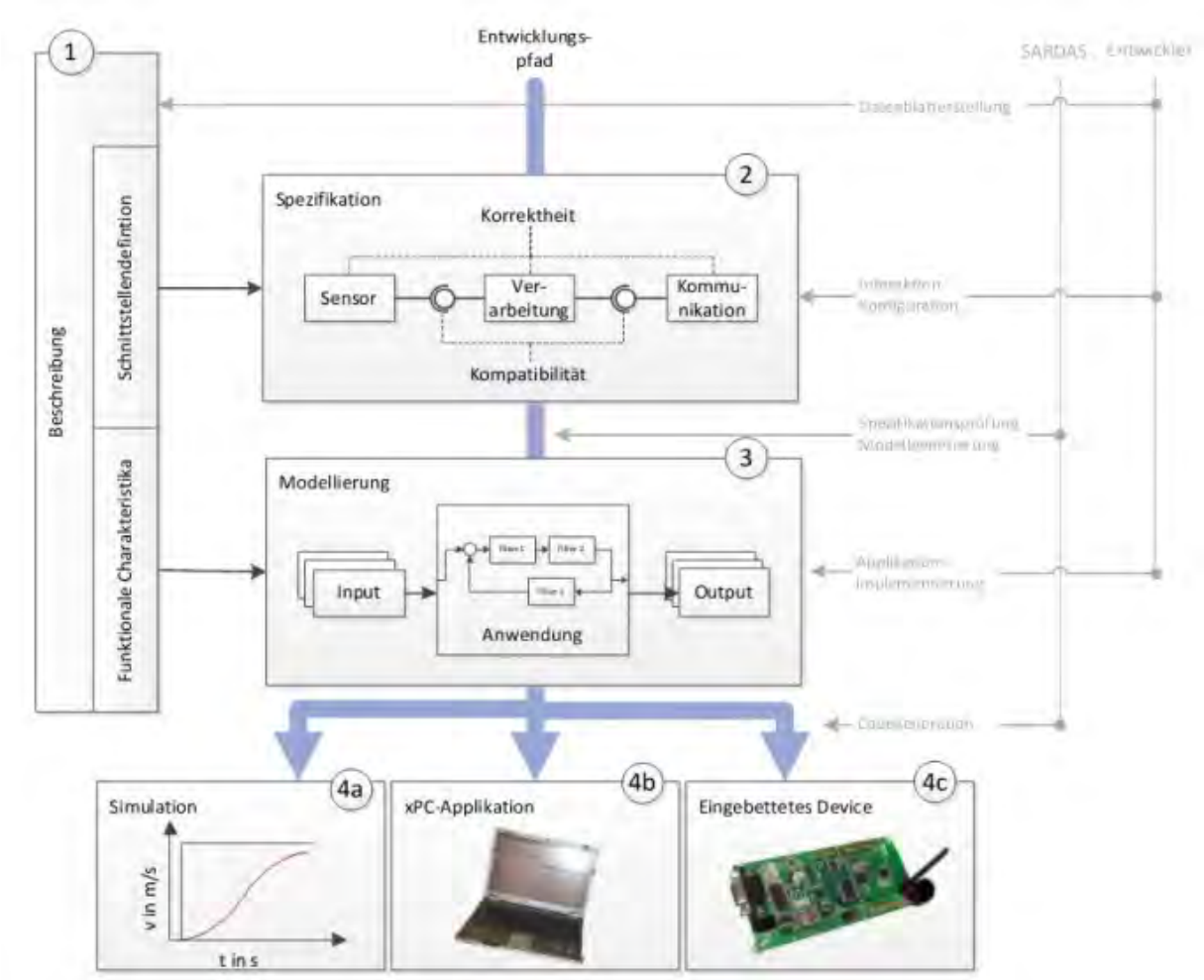


Abbildung 5: 4-stufiger Workflow (Beschreibung, Spezifikation, Modellierung, Ausführungsumgebung) von SardaS

Unter den funktionalen Charakteristika verbirgt sich das spezifische Verhalten eines Bestandteils. Für die Berücksichtigung einer multiplen Ausführungsdarstellung (Simulation, C-Code) sind unterschiedliche Verhaltensbeschreibungen anzugeben. Eine Verhaltensbeschreibung basiert auf der Beschreibung von Simulink Blöcken, weil ein Simulink Block die Kapselung einer Funktionalität darstellt. Nicht-funktionale Charakteristika stellen weiterführende Informationsinhalte eines Bestandteiles in Form einer Klartext-, Signal- oder Anschlussbeschreibung bereit.

6 Spezifikation

Mit der Spezifikation wird eine Plattform bestehend aus Sensorik, Signalverarbeitung, Verarbeitungseinheit und Kommunikationsschnittstelle in Simulink nachgebildet sowie hinsichtlich deren Korrektheit und Kompatibilität

Dieser Entwicklungsschritt ist in der Abbildung 5 unter der Nummer Zwei abgebildet. Für die Spezifikation einer Plattform werden die Schnittstellen der involvierten Bestandteile in Simulink nachgebildet. Der Informationsgehalt über die Schnittstellen resultiert aus der vorangegangen Beschreibung.

Im Rahmen der Spezifikation muss der Entwicklungsingenieur die Interaktion zwischen Sensorik, möglicher Signalverarbeitung, Verarbeitungseinheit und Kommunikationsschnittstelle herstellen. Im Anschluss sind die Parameter der verwendeten Schnittstellen zu konfigurieren. SardaS überprüft die Interaktion auf Korrektheit und die konfigurierten Schnittstellenparameter auf Kompatibilität.
Für den Nachweis einer korrekten Schnittstelleninteraktion werden reguläre Ausdrücke eingesetzt. Dabei wird eine Interaktion aus Sensorik, Signalverarbeitung, Verarbeitungseinheit und Kommunikation in genau dieser

Reihenfolge als Korrekt bewertet. Die Kompatibilität der Schnittstellenparameter garantierten generische S-Functions, welche die Schnittmenge des Wertebereiches der konfigurierten Schnittstellenparameter bilden. Im Anschluss der Spezifikation wird eine Beschreibung der Schnittstelleninteraktion sowie konfigurierter Schnittstellenparameter angefertigt. Diese Spezifikationsbeschreibung ermöglicht die automatisierte Transformation eines Plattformunabhängigen Modells (PIM) in eine Plattformabhängige Modelldarstellung (PSM).

7 Modellierung

Die Modellierung transformiert eine Plattformunabhängige (PIM) in eine Plattformspezifische Modelldarstellung (PSM). Für die Überführung einer Plattformspezifische (PSM) in die Implementationsspezifische Darstellung (ISM) greift SardaS auf den Code Generator von Simulink zurück. Im Rahmen der Modellierung lässt sich eine Plattformspezifische Modelldarstellung (PSM) in eine alternative PSM transformieren. In der Abbildung 5 entspricht die Modellierung dem Entwicklungsschritt mit der Nummerierung Drei.

Eine vorliegende Anwendung, die Spezifikationsbeschreibung für eine Plattform sowie die funktionalen Charakteristika bilden die Ausgangsbasis für die Durchführung der Modellierung. Im ersten Schritt erfolgt die Transformation einer Plattformunabhängigen (PIM) in die Plattformspezifische Modelldarstellung (PSM). Bei der Plattformunabhängigen Darstellung (PIM) handelt es sich um die reine Anwendung.

Für die Transformation der Anwendung in eine Plattformspezifische Darstellung (PSM) sind die Gerätetreiber in Abhängigkeit der Verarbeitungseinheit sowie die Interpretation der Messwerte in Abhängigkeit der Sensorik bereitzustellen. Diese Abhängigkeitsrelation lässt unter Zuhilfenahme der Spezifikationsbeschreibung auflösen, weil die gesamten Bestandteile einer spezifischen Plattform mit Schnittstelleninteraktion und Konfiguration in dieser Beschreibung aufgeführt sind. Im Anschluss kann die Plattformspezifische (PSM) in eine Implementationsspezifische Darstellung unter Einsatz des Code Generators von Simulink überführt werden. Dieser Transformationsschritt ist in der Abbildung 5 unter der Nummerierung Vier visualisiert.

Eine Besonderheit der Modellierung stellt die Transformation von PSM in PSM für den Einsatz von SiL oder HiL Praktiken dar. Hierbei ist keine erneute Durchführung der Spezifikation erforderlich, weil die Überprüfungstechniken bezüglich Korrektheit und Kompatibilität auf die alternative Plattformbeschreibung angewendet werden.

Mit der PSM zu PSM Transformation lässt sich neben der Verarbeitungseinheit auch die Sensorik oder Kommunikationsschnittstelle austauschen.

8 Zusammenfassung

SardaS ermöglicht die Entwicklung von intelligenten Sensoren in Form der MDA Technik. Für die Realisierung von SardaS war die Entwicklung einer Beschreibungstechnik für die heterogenen Bestandteile von intelligenten Sensoren sowie eine Modelltransformation für Simulink Modelle zu entwickeln. Die entwickelte Beschreibungstechnik vereint die Flexibilität mit der Widerspruchsfreiheit und bildet die Schnittmenge der verwandten Arbeiten.

Mit der Spezifikation wird neben der Anwendungsentwicklung eine zusätzliche Modellierungsdarstellung verwendet. Im Rahmen der Spezifikation erleichtern integrierte Überprüfungsmechanismen dem Entwicklungsingenieur die täglich Arbeit und leisten mit der Korrektheits- sowie Kompatibilitätsaussage einen Beitrag zur Fehlerprävention. Die Beschreibung und Spezifikation trennen die Hardware von der eigentlichen Anwendung und reduzieren das benötigte Expertenwissen im Rahmen der Entwicklung.

Die Entwicklung von technischen Systemen beschränkt sich lediglich auf die Anwendungsentwicklung bei einer vorliegenden Beschreibung der Bestandteile sowie Spezifikationsbeschreibung. Die Wiederverwendbarkeit der Beschreibungen reduziert den Aufwand zur Entwicklung neuer Systeme. Zudem lässt sich mit dem Modellgenerator Entwicklungszeit einsparen und mit verschiedenen Kombination aus Verarbeitungseinheit und Sensorik experimentieren.

Der Einsatz von SardaS zur Entwicklung alternativer Systeme erfordert lediglich eine Anpassung der regulären Ausdrücke. Die Kompatibilitätsanalyse basiert auf S-Functions und unterliegt bereits einer generischen Auslegung. Als zukünftige Erweiterung ist die Fehlerbewertung des entwickelten Systems über „Fault detection and isolation" (FDI) und „Fault propagation analysis" (FPA) ausgehend von der Spezifikationsbeschreibung geplant. Eine Erweiterung der Modellgeneration zur Bereitstellung einer Sensorfusion ist ebenfalls denkbar. Zudem kann die Spezifikationsbeschreibung von SardaS für eine „Printed Circuit Board" (PCB) Generation herangezogen werden.

9 Literatur

[1] Nikolaĭ Vladimirovich Kirianaki, 2002, Data Acquisition and Signal Processing for Smart Sensors

[2] Sami Beydeda, Matthias Book, Volker Gruhn, 2005, Model-driven software development

[3] OpenGIS Sensor Model Language (SensorML) Implementation Specification, 2007

[4] Frank Randy, 2000, Understanding Smart Sensors

[5] Kopetz, 2003 OMG Smart Transducer Spezification(II)

[6] PSoC Designer – IDE Guide

[7] Mathworks Simulink – Users guide , 2010

TRANSFER VON ERFAHRUNGSWISSEN IN DER INSTANDHALTUNG – ZUR FÖRDERUNG DER PROBLEMLÖSEFÄHIGKEIT TECHNISCHER EXPERTEN

Dipl.-Päd. Wilhelm Termath
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Berufs- und Betriebspädagogik

TRANSFER VON ERFAHRUNGSWISSEN – ZUR FÖRDERUNG DER PROBLEMLÖSEFÄHIGKEIT VON EXPERTEN IN DER INSTANDHALTUNG

Dipl.-Päd. Wilhelm Termath, Institut für Berufs- und Betriebspädagogik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

1 Abstract

Die Instandhaltung technischer Systeme erfordert über das systematische Fachwissen hinaus umfangreiches arbeits-prozessbezogenes Wissen. Das gilt in erhöhtem Maße für die Analyse und Behebung von Störungen im Sinne von Problemlösefähigkeit. Die Einarbeitungszeit der Fachkräfte nach Abschluss der Ausbildung bzw. des Studiums beträgt ca. drei Jahre bis zur Befähigung zur selbständigen Bearbeitung von komplexen Instandhaltungsarbeiten. Aufgrund der langfristigen Betriebsdauer von Maschinen, Anlagen und Betriebsmitteln sowie der oft mehrjährigen Instandhaltungszyklen ist es von besonderer Bedeutung, das im Zuge der jahrelangen Arbeit erworbene Erfahrungswissen der Experten für das Unternehmen zu erschließen und nutzbar zu machen. Im Beitrag wird ein Ansatz zum Transfer des erfahrungsbasierten Wissens vorgestellt.

2 Ausgangslage / Motivation

2.1 Expertenwissen und demografische Entwicklung

Die Bevölkerungsentwicklung in der Bundesrepublik Deutschland zeigt seit den 1970er Jahren einen Rückgang der Geburtenrate bei gleichzeitigem Anstieg der erwarteten Lebensdauer. In der Folge sind die Unternehmen gefordert, hohe Produktivität sowie Produkt- und Prozessinnovationen im Wettbewerb mit älteren Belegschaften sicherzustellen. [9] Ein zentraler Ansatz zur Bewältigung dieser Herausforderung ist die Erhöhung der Beschäftigungsquote älterer Mitarbeiter. Im Vergleich europäischer Staaten lässt sich für Deutschland ein erhebliches Verbesserungspotential fest-stellen, insbesondere gegenüber den offensichtlichen Erfolgen skandinavischer Staaten. Dabei wird die überragende Bedeutung der beruflichen Weiterbildung hervorgehoben. [12]

Eine besondere Form innerbetrieblicher Weiterbildung ist der gegenseitige Transfer der unterschiedlichen Fähigkeiten und Kompetenzen älterer und jüngerer Mitarbeiter. Die langjährig beschäftigen Mitarbeiter verfügen häufig über wertvolles erfahrungsbasiertes Wissen. In betrieblichen Problemlösungsprozessen haben sie systematisches Fachwissen mit reflektierten Ergebnissen aus besonders schwierigen oder komplexen Arbeitsaufgaben verknüpft. In der verantwortlichen Bearbeitung von Arbeitsaufgaben werden darüber hinaus das betriebsbezogene Werte- und Normensystem sowie die subjektive Interpretation der Situation handlungsleitend wirksam. Die jüngeren Fachkräfte bringen mit ihrem aktuellen Fachwissen auch neuere Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung ein. [6]

Das erfahrungsbasierte Wissen der Experten ist in der Regel nicht vollständig dokumentiert. Als „implizites Wissen“ ("tacit knowledge“) steuert es mehr oder weniger bewusst die Arbeitshandlungen von Experten. Diese Expertise ist also über das intentionale, fachsystematische Lernen in der beruflichen Aus- und Weiterbildung hinaus das Ergebnis von beruflicher Handlungserfahrung. [10] [15]

In der Instandhaltung von Maschinen, Anlagen und Betriebsmitteln mit einem langen Produktlebenszyklus erhält dieser Zusammenhang besondere Relevanz. Ein erheblicher Teil der erfolgreichen Strategien zur Fehleranalyse und –behebung ist im individuellen, erfahrungsbasierten Können der Experten begründet. Ein großer Teil dieses Wissens ist eher informell erworben, enthält als implizites Wissen subjektive Einschätzungen, Deutungen von Werten und Normen. Es ist unmittelbar eingebettet in das individuelle Erleben in den jeweiligen Arbeitssituationen. [2] Es ist auch für Experten selbst i.d.R. nicht unmittelbar und systematisch abruf- und dokumentierbar, z.B. für Berichte und Protokolle.

In der betrieblichen Praxis ist der Transfer dieses Erfahrungswissen oft an den persönlichen Austausch von erfahrenen Experten und jungen Nachwuchsfachkräften gebunden. Das erfordert einen hohen Personaleinsatz, z.B. durch den Einsatz altersgemischter Teams oder Lerntandems. Aufgrund der damit verbundenen Kosten scheidet dieser Weg für viele, insbesondere mittelständische Unternehmen aus. Zudem wird damit noch nicht das Problem gelöst, dass der Wissens- und Kompetenztransfer auf einzelne Mitarbeiter beschränkt bleibt.

Eine überindividuelle Nutzung des erfahrungsbasierten Wissens setzt aber voraus, dass es ohne Substanzverlust expliziert wird, um es dokumentieren und transferieren zu können. Methodische Ansätze zur Explizierung des impliziten Wissens sind narrative Methoden wie das Story Telling und die Triadengespräche [4], Facharbeiter-Experten-Workshops sowie Fach- und Experteninterviews. [17]

2.2 Problemlösefähigkeit als Qualifikationsanforderung in der Instandhaltung

In einem von Karlheinz Sonntag und Niclas Schaper heraus-gegeben Sammelband wurden in einem interdisziplinären Ansatz aus Arbeits-, Ingenieur- und Kognitionspsychologie sowie der Pädagogischen Psychologie und der Informatik die Anforderungen an Mitarbeiter als Problemlöser in der Instandhaltung untersucht. [14] Unter anderem wurden die Wissensanforderungen bei der Störungsdiagnose in einem von der DFG geförderten Projekt untersucht. [13] Die Unter-suchung bezog sich auf die Entwicklung effektiver Qualifizierungskonzepte auf Basis der Erkenntnis, dass die für die Instandhaltung erforderlichen Qualifikationen nur zu einem geringen Teil in der beruflichen Ausbildung erworben wer-den. Das für die Fehleranalyse und -behebung erforderliche Wissen wird überwiegend durch Erfahrung und Reflexion erworben. Hinsichtlich der Anforderungen der Instandhaltungstätigkeiten an die Fachkräfte wird zwischen folgenden Wissenskomponenten unterschieden:

- Technisches Wissen über Maschinen sowie über potentielle Störungen
- Wissen über Vorgehensweisen zur Fehleranalyse, Einsatz von Messgeräten und Prüfung von Hypothesen über Störungsursachen
- Strategisches Wissen zur Fehleranalyse und deren Übertragbarkeit. vgl. [13] S. 143

Im Ergebnis steht für die Autoren außer Zweifel, dass das Verhalten eines Instandhalters bei der Fehleranalyse neben seinem Faktenwissen auch vom Handlungswissen gesteuert wird, welches im betrieblichen Arbeitsprozess erworben wird. Offen bleibt jedoch, welche kognitiven Prozesse bei der Aktivierung der jeweiligen Wissensarten ablaufen.

Die Entwicklung und Erprobung von Instruktionsmethoden zur Förderung der diagnostischen Problemlösefähigkeit anhand der Nutzung des Fakten- und Handlungswissens wurde in einer weiteren Studie untersucht. [14] Der konzeptionelle Ansatz für die Trainings war der Einsatz „Heuristischer Regeln", d.h. Anweisungen zum Problemlösen zur Unterstützung und Steuerung der Analyse-, Planungs- und Entscheidungsschritte. In diesem Zusammenhang wurde das Problem der Analyse und Aufbereitung der Problemlösestrategien von Experten als Grundlage der Trainings nicht befriedigend gelöst. vgl. [14] S. 194

Anschließend wurden Ergebnisse der Untersuchung des Einflusses von Selbstreflektionstechniken auf das Problemlöseverhalten von Auszubildenden herangezogen. Die Pro-banden sollten im Anschluss oder während der Trainings z.B. Fragen beantworten wie: Was habe ich vermutet? Wie bin ich vorgegangen? Warum bin ich so vorgegangen? Was muss ich verändern? Im Ergebnis wurde festgestellt, dass die Probanden mehr Fehler in kürzerer Zeit entdeckt haben. Sie benötigten weniger Zeit und arbeiteten zielgerichteter.

Zur Verbesserung der Akzeptanz dieser Selbstbefragungsmethoden schlagen die Autoren vor, die Interaktionsmöglichkeiten der Lernenden während der Trainings zu verbessern. vgl. [14] S. 194

Zusammenfassend verweisen die Autoren auf das Lernen in möglichst authentisch gestalteten Lernsituationen. Die Nutzung des Wissens soll in die Bearbeitung realer Arbeits-aufgaben eingebettet sein und damit verbessert und gesichert werden.

3 Lösungsansätze

Über die Verfügbarkeit von Daten und Informationen aus dem Einsatz von Maschinen und Anlagen bzw. dem Instandhaltungsprozess hinaus wird das erfahrungsbezogene Wissen der Instandhaltungsfachkräfte derzeit überwiegend in zweifacher Weise vermittelt:

- in Fortbildungsveranstaltungen durch Dozenten, die als Experten die Präsentation der fachsystematischen Inhalte durch praktische Beispiele aus realen Arbeitssituationen mündlich erläutern und ergänzen,
- unmittelbar im Arbeitsprozess bei der Lösung auftretender Probleme durch die fernmündliche Beratung und Anleitung der Fachkräfte.

Im Folgenden wird das Triadengespräch als eine Methode zur Erhebung erfahrungsbasierten Wissens vorgestellt. Für den Transfer impliziten Erfahrungswissens werden anschließend die Potentiale von virtuell-interaktiven Lernumgebungen skizziert.

3.1 Erheben von Erfahrungswissen - das Triadengespräch

Das Triadengespräch ist eine Methode zur Weitergabe erfahrungsbasierten Wissens. Es wurde in einem Pilotprojekt von Prof. Michael Dick von der Hochschule für angewandte Psychologie am Institut für Kooperationsforschung und -entwicklung der FH Nordwestschweiz in Olten mit der Entwicklungsabteilung der Airbus Deutschland GmbH entwickelt und erprobt. [4]
Es ist ein räumlich und zeitlich begrenztes Gespräch zu einem vorher vereinbarten Thema, an dem drei Personen in spezifischen Rollen teilnehmen:

– Der Erzähler / Wissensgeber als Experte und Erfahrungsträger
– Der Zuhörer / Wissensnehmer als Novize bzw. weniger erfahrenem Mitarbeiter mit dem Anspruch, vom Experten zu lernen
– Der fachliche Laie als methodischer Experte und Moderator

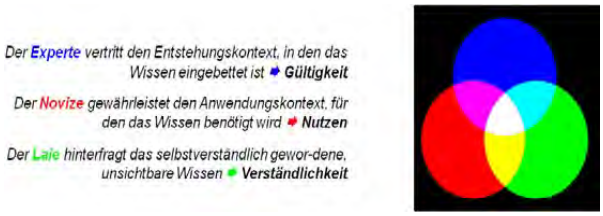

Der Experte vertritt den Entstehungskontext, in den das Wissen eingebettet ist → Gültigkeit
Der Novize gewährleistet den Anwendungskontext, für den das Wissen benötigt wird → Nutzen
Der Laie hinterfragt das selbstverständlich gewordene, unsichtbare Wissen → Verständlichkeit

Abbildung 1: Die Rollen im Triadengespräch

Der Experte schildert Situationen, in denen er bedeutsame Erfahrungen gesammelt hat. Das können gute Lösungen sein, aber auch Lösungswege oder Einsichten, die er bei der Bewältigung schwieriger Situationen gewonnen hat. Der fachliche Zuhörer vollzieht das Handeln des Experten mit, versucht sich fachlich zu orientieren und nachzuerleben. Dieses Eintauchen in das erzählte Geschehen wird dadurch erleichtert, dass der fachliche Zuhörer keine Verantwortung für den Rahmen des Gesprächs übernehmen muss, diese ist an den Moderator delegiert.
Der Moderator sorgt dafür, dass Erzähler und Zuhörer am Thema bleiben, Unklarheiten bereinigen und tatsächlich personenbezogenes, implizites Wissen weitergeben. Er hält während der Erzählung die Außenperspektive, während der fachliche Zuhörer sich in das Erleben des Erzählers hinein-versetzt.

Die Einführung der Methode erfordert eine sorgfältige Vorbereitung auf allen beteiligten Ebenen eines Unternehmens, siehe Abbildung 2.

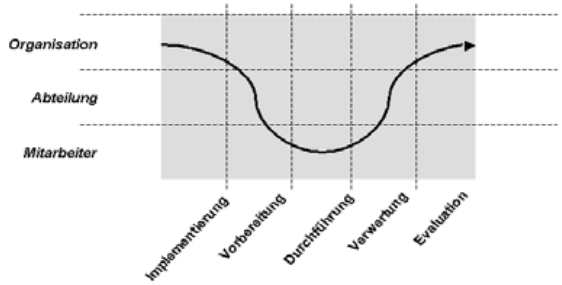


Abbildung 2: Darstellung der organisationalen Integration des methodischen Vorgehens [3]

Insbesondere ist es wichtig, eine Vertrauensbasis zwischen allen Beteiligten zu schaffen. Der Nutzungszusammenhang des erhobenen Wissens muss von der Geschäftsführung transparent kommuniziert werden. Die erfahrenen Experten im Unternehmen dürfen nicht befürchten müssen, ihres Wissens "enteignet" zu werden. Sie haben natürlich ein Bewusstsein dafür, dass ihre Expertise ein wesentlicher Leistungsfaktor ihres Unternehmens ist und damit auch eine starke persönliche Stellung im Unternehmen begründet. Ohne eine glaubwürde Personalentwicklungsstrategie mit der Perspektive eines fairen und für alle Beteiligten vorteilhaften gegenseitigen Transfers von Wissen besteht die Gefahr, dass die Experten sich den Gesprächen entziehen oder sich auf allgemein verfügbares Wissen beschränken. Andererseits wird die Beteiligung an einem Triaden-gespräch von den Experten vielfach auch als Anerkennung ihrer Person und ihrer fachlichen Kompetenz wahrgenommen.

Das Gespräch wird strukturiert in folgenden Schritten durchgeführt:

– Ausgangssituation: wie alles anfing
– Fortgang: für die "Geschichte" wesentliche Erfahrungen
– Auflösung: was daraus wurde

3.2 Ergebnisse dokumentieren und auswerten

Entsprechend den spezifischen betrieblichen Regelungen oder Vereinbarungen werden die Gespräche per Tonband aufgezeichnet oder von einer vierten Person protokolliert. Die Ergebnisse werden z.B. in Themenlandkarten, Job-Maps oder einer Erfahrungslandkarte dokumentiert, wie sie in Abbildung 3 exemplarisch dargestellt ist.

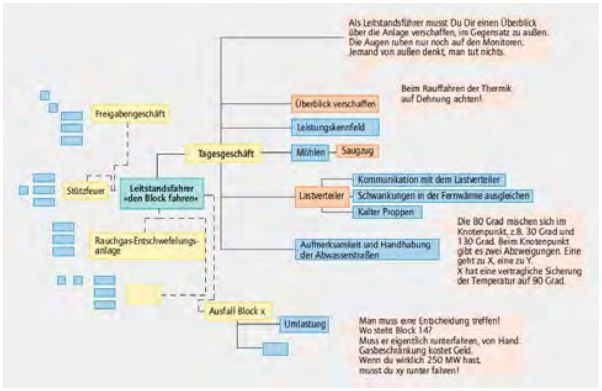

Als Leitstandsführer musst Du Dir einen Überblick über die Anlage verschaffen, im Gegensatz zu außen. Die Augen ruhen nur noch auf den Monitoren, Jemand von außen denkt, man tut nichts.
Beim Rauffahren der Thermik auf Dehnung achten!
Freigabengeschäft
Überblick verschaffen
Leistungskennfeld
Tagesgeschäft
Mühlen
Saugzug
Stützfeuer
Leitstandsfahrer «den Block fahren»
Kommunikation mit dem Lastverteiler
Lastverteiler
Schwankungen in der Fernwärme ausgleichen
Kalter Propfen
Rauchgas-Entschwefelungs-anlage
Aufmerksamkeit und Handhabung der Abwasserstraßen
Die 80 Grad mischen sich im Knotenpunkt, z.B. 30 Grad und 130 Grad. Beim Knotenpunkt gibt es zwei Abzweigungen. Eine geht zu X, eine zu Y. X hat eine vertragliche Sicherung der Temperatur auf 90 Grad.
Ausfall Block x
Umlastung
Man muss eine Entscheidung treffen! Wo steht Block 14? Muss er eigentlich runterfahren, von Hand. Gasbeschränkung kostet Geld. Wenn du wirklich 250 MW hast, musst du xy runter fahren!

Abbildung 3: Auszug aus einer Erfahrungslandkarte [4]

Die konkrete Form der Ergebnisdarstellung und Auswertung hängt von den Bedingungen und Interessen der Beteiligten in den Unternehmen ab. Beispielsweise können auch informelle Kooperationsbeziehungen, nicht dokumentierte Regeln oder latente Konflikte herausgearbeitet werden.

Für eine über den persönlichen Austausch der am Gespräch beteiligten Mitarbeiter hinausgehenden Transfer der Gesprächsergebnisse ist die textliche Dokumentation der Gespräche allein noch nicht geeignet. Für eine Nutzung der Gesprächsinhalte in der innerbetrieblichen Aus- und Weiterbildung bzw. dem Wissensmanagement bedarf es weiterer Arbeitsschritte.

Zunächst sind die wesentlichen Inhalte hinsichtlich ihres Potentials für eine allgemeine Gültigkeit zu überprüfen.

Nicht jede elegante Vereinfachung eines Arbeitsprozesses ist eine gute oder beste Lösung, wenn z.B. Gesichtspunkte der Arbeitssicherheit nicht oder nicht ausreichend beachtet worden sind. Unzulässige Vereinfachungen oder Umgehungen von Arbeitsschutzvorrichtungen können aber wichtige Anhaltspunkte zur Verbesserung technischer Lösungen oder zur Präzisierung von Arbeitsanweisungen oder Schulungs-inhalten bieten.

Darüber hinaus ist die textliche Zusammenfassung der Gesprächsergebnisse oder auch die grafische Darstellung der Themen kaum geeignet, die situativen, personen-, werte- und prozessbezogenen Gesprächsinhalte angemessen zu dokumentieren.

Mit Bezug auf die oben von Sonntag und Schaper fokussierte Bedeutung des situierten Lernens in authentischen Lern-situationen soll im Folgenden das Potential von VR-basierten Lernumgebungen skizziert werden.

3.3 Authentische Lernaufgaben virtuell bearbeiten

Bei der Qualifizierung von gewerblich-technischen Fachkräften für die Instandhaltung besteht ein grundlegendes Problem darin, dass die im Einsatz befindlichen Maschinen, Anlagen oder Betriebsmittel aus Kosten- und Sicherheitsgründen und wegen der Integration in Arbeitsprozesse kaum für Schulungszwecke genutzt werden können. Darüber hinaus ist es i.d.R. nicht möglich, die funktionalen Vor-gänge innerhalb der Betrachtungseinheiten zu beobachten. Deren Verständnis erfordert deshalb von den Fachkräften ein hohes Maß an technischem Wissen und Abstraktionsfähigkeit. Einem erfolgversprechenden Lernen im realen Arbeitsprozess werden damit enge Grenzen gesetzt.

Die virtuelle Repräsentation realer Maschinen und Anlagen kann zur Lösung dieses Problems beitragen. Sie erlaubt in diesem Zusammenhang zunächst, die in der Realität nicht einsehbaren Bauteile und Baugruppen, Funktionen und Wirkungsweisen zu visualisieren.
Das besondere Potential für den Transfer erfahrungsbasierten Wissens im Sinne dieses Ansatzes entfalten virtuelle Lernumgebungen jedoch erst mit der Möglichkeit, komplexe Aufgaben in der virtuellen Arbeitsumgebung selbständig und vollständig bearbeiten zu können.
Hierzu werden besonders wissensintensive bzw. lernhaltige Arbeitsprozesse als Lernaufgaben didaktisch aufbereitet. Die Bearbeitung der Lernaufgabe wird im Sinne der "voll-ständigen Handlung" in folgende Phasen strukturiert:

- Informieren
- Planen
- Entscheiden
- Ausführen
- Kontrollieren
- Bewerten [3] S. 147 ff.

In der Abfolge dieser Arbeitsschritte wird der Lernende im virtuellen System geführt. Für die Steuerung des Lernenden durch den Arbeitsprozess werden zum Einen Instruktionen vorgegeben. Darüber hinaus werden zu allen Arbeitsschritten Leitfragen eingesetzt. Sie dienen den Nutzern der Lern-systeme als Anregung zur Beschaffung von Informationen, zur Reflexion alternativer Lösungsmöglichkeiten oder zur Überprüfung von Arbeitsergebnissen.

Die Relevanz des arbeitsprozessintegrierten Lernens wird nicht nur in der Berufspädagogik hervorgehoben.
In einer arbeitspsychologischen Dissertation [11] werden empirische Untersuchungen referiert, nach denen das Lernen im Prozess der Arbeit mit einem Anteil 44 % als wichtigste Quelle der aktuellen Handlungskompetenz gegen-über der Ausbildung mit 33 % und der Weiterbildung mit 23 % angesehen wird. vgl. [11] S. 157
Im Rahmen von Instandhaltungsaufgaben wiederum werden die Aufgaben der Fehleranalyse und -behebung als besonders problemhaltig eingeschätzt. Die Dauer der Beschäftigung mit problemhaltigen Aufgaben wird mit Verweis auf mehrere Untersuchungen als Prädiktor für Leistungen mit unvorhergesehenen Anforderungen interpretiert. vgl. [11] S. 157

Insofern bieten VR-basierte Lernumgebungen das Potential, die oben skizzierten Restriktionen für das arbeitsprozessintegrierte Lernen zu relativieren. Durch die virtuelle Bearbeitung simulierter Arbeitsaufgaben kann die Leistungsfähigkeit der Fachkräfte in der Instandhaltung in besonderer Weise gefördert werden.

Soweit die Komplexität der didaktisch aufbereiteten Arbeitsprozessen angemessen abgebildet wird, können auch die prozeduralen Anteile der Problemlösung und damit die Anteile impliziten Erfahrungswissens herausgearbeitet und über den unmittelbaren Austausch im persönlichen Gespräch hinaus verfügbar gemacht werden.
Hier bieten Leitfragen die Möglichkeit, z.B. zum selbständigen Nachvollzug der Entscheidungsstrategien von Experten in bestimmten Situationen anzuregen oder die Berücksichtigung wesentlicher Einflussfaktoren nicht zu vernachlässigen.

In Abbildung 4 wird exemplarisch gezeigt, wie im Kontext-menü einer virtuellen Lernumgebung auf Erfahrungswissen als objektspezifisch zugeordnete Kennzahlen und deren Interpretation, virtuelle Sequenzen der techni-

schen Problemlösung, audiovisuelle Einspielungen von Interviews mit Erläuterungen zum Vorgehen oder seltene Fehlerbilder zugegriffen werden kann.

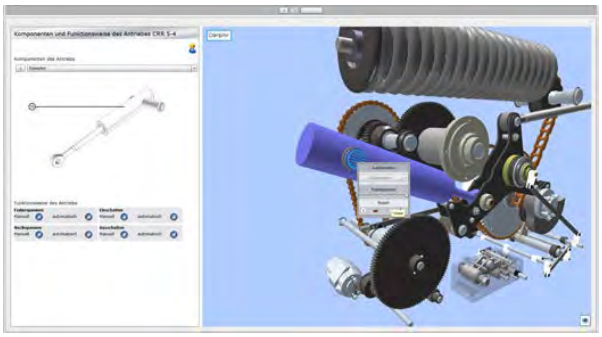


Abbildung 4: Beispiel der Zuordnung eines Kontextmenüs zu der Baugruppe eines Schalterantriebes [Fraunhofer IFF]

4 Ausblick

Eine VR-basierte Lern- und Wissensinfrastruktur kann durch die Integration von fachsystematischem und erfahrungsbasierten Wissen aus dem Betrieb und der Instandhaltung in Verbindung mit Objektdaten aus der Entwicklung und Fertigung zu einem wirkungsvollen und flexiblen Instrument des Transfers von unternehmensbezogenem knowhow wer-den. Aufgrund des Objekt- und Prozessbezuges der hinter-legten Informationen und Wissensbestandteile können die Nutzer auch intuitiv darauf zugreifen.

Für Instandhaltungsarbeiten an dezentralen Einsatzstellen bieten die Technologien des mobilen Lernens erhebliche Potentiale zur Effizienzsteigerung der VR-Umgebungen.

5 Literatur

[1] Beuting, J., Haase, T., Termath, W. (2010): Qualifizierung in der Instandhaltung von Hochspannungsbetriebsmitteln, In: Jenewein, K., Schenk M., (Hrsg.): Virtuelle Realität in der technischen Aus- und Weiterbildung – Gegenstandsbe-stimmung und Umsetzungsbeispiele, IBBP-Arbeitsbericht Nr. 74, Magdeburg

[2] Böhle, F. (2005): Erfahrungswissen hilft bei der Bewältigung des Unplanbaren. In: Berufsbildung in Wissenschaft und Praxis, 34. Jahrgang, Heft 5/2005

[3] Bonz, G., (1999): Methoden der Berufsausbildung - ein Lehrbuch. Stuttgart

[4] Dick, M., Braun, M., Eggers, I., Hildebrandt, N., (2010): Wissenstransfer per Triadengespräch: eine Methode für Praktiker. In: zfo – Zeitschrift Führung + Organisation, 79. Jahrgang, Heft 06/2010, S. 375-383

[5] Dick, M. (2007): Das Lerntätigkeitssystem als Rahmenkonzept für die Gestaltung, Implementierung und Nutzung von VR im Arbeitsprozess, In: Kompetenzentwicklung in realen und virtuellen Arbeitssystemen, Bericht zum 53. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft vom 28.02. – 02.03.2007 in Magdeburg, Dortmund, 2007, S. 29 ff.

[6] Drescher, E. (2002): Arbeitsprozesswissen in der betrieblichen Instandhaltung, In: Fischer M., Rauner, F.: Lernfeld Arbeitsprozess – Ein Studienbuch zur Kompetenzentwicklung von Fachkräften in gewerblich-technischen Aufgaben-bereichen, Baden-Baden, 2002, S.255 ff.

[7] Frackmann, M., Tärre M., (2009): Lernen und Problemlösen in der beruflichen Bildung. Bielefeld

[8] Hacker. W.: Wissensdiagnose, In: Rauner, F. (Hrsg.) (2005): Handbuch Berufsbildungsforschung, Bielefeld, S. 616-622

[9] Langhoff, T. (2009): Den demographischen Wandel im Unternehmen erfolgreich gestalten – Eine Zwischenbilanz aus arbeitswissenschaftlicher Sicht, Heidelberg

[10] Neuweg, G.H. (1999): Könnerschaft und implizites Wissen – Zur lehr-lerntheoretischen Bedeutung der Erkenntnis- und Wissenstheorie Michael Polanyis, Münster 1999, 3. Auflage 2004

[11] Muellerbuchhof, Ralf, (2007): Kompetenzmessung und Kompetenzentwicklung - Empirische Studien an technischem Fachpersonal für Instandhaltung im Hochtechnologiebereich. Frankfurt am Main

[12] Richenhagen, G. 2007): Demografischer Wandel in der Arbeitswelt – Stand und Perspektiven in Deutschland 2007, In: Kompetenzentwicklung in realen und virtuellen Arbeits-systemen, Bericht zum 53. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft vom 28.02. – 02.03.2007 in Magdeburg, Dortmund, 2007, S. 717 ff.

[13] Rothe, H.-J, Timpe, K.-P (1997): Wissensanforderungen bei der Störungsdiagnose an CNC-Werkzeugmaschinen. In: Sonntag, Karlheinz, Schaper, Niclas, (1997): Störungsmanagement und Diagnosekompetenz. Leistungskritisches Denken und Handeln in komplexen technischen Systemen. vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich, S. 137 - 154

[14] Schaper, N., Sonntag, K., (1997): Kognitive Trainingsmethoden zur Förderung diagnostischer Problemlösefähigkeiten. In: Sonntag, Karlheinz, Schaper, Niclas, (1997): Störungsmanagement und Diagnosekompetenz. Leistungskritisches Denken und Handeln in komplexen tech-

nischen Systemen. vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich, S. 193 - 210

[15] Schilcher, C. (2006): Implizite Dimensionen des Wissens und ihre Bedeutung für betriebliches Wissensmanagement, Darmstadt

[16] Sonntag, Karlheinz, Schaper, Niclas, (1997): Störungs-management und Diagnosekompetenz. Leistungskritisches Denken und Handeln in komplexen technischen Systemen. vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich

[16] Spöttl, G. (2005): Experten-Facharbeiter-Workshops, In: Rauner, F. (Hrsg.): Handbuch Berufsbildungsforschung, Bielefeld, 2005, S. 611-616

[17] Termath, W., Kumetz, S. (2010): Aus- und Weiterbildung des Instandhaltungspersonals. In: Schenk, M. (2010): Instandhaltung technischer Systeme - Methoden und Werk-zeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebes. Heidelberg, S. 289 - 312

EFFIZIENTE ERSTELLUNG EINER INTERAKTIVEN KOMPONENTEN-DARSTELLUNG

Dipl.-Ing. Tina Haase
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Virtuell Interaktives Training

Dipl.-Ing. Marc Winter
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Virtuell Interaktives Training

EFFIZIENTE ERSTELLUNG EINER INTERAKTIVEN KOMPONENTENDARSTELLUNG

Dipl.-Ing. Tina Haase, Dipl.-Ing. Marc Winter, Virtuell Interaktives Training,
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF

Abstract

Aufgrund der aktuellen demografischen Entwicklung stehen die Unternehmen zunehmend vor dem Problem, das Wissen erfahrener Experten zu verlieren. Der Aufbau einer VR-basierten Wissensbasis ist ein Ansatz dieses Wissen nachhaltig zu dokumentieren. Ein Bestandteil dieser Wissensbasis ist eine Komponentendarstellung der Maschine. Der vorliegende Beitrag stellt eine effiziente Methode für die Entwicklung einer solch interaktiven Komponentendarstellung vor.

Diese kann mit dem Wissen der Experten verknüpft werden, indem z.B. Tipps & Tricks der Experten aus bereits bearbeiteten Arbeitsaufträgen hinterlegt wird. Die entwickelte Vorgehensweise erlaubt es den Fachexperten diese Darstellungen selbst zu erstellen. Sie erhalten alle dazu notwendigen Funktionen in einer Software, Abhängigkeiten zu externen Softwarewerkzeugen wie z.B. Bildbearbeitungsprogrammen bestehen nicht. Die Methode wird im vorliegenden Artikel beispielhaft für die Komponentendarstellung eines Leistungsschalters beschrieben.

1 Motivation

Die aktuelle demografische Entwicklung [6] stellt die Unternehmen mehr denn je vor die Herausforderung, ihre Arbeitsprozesse auch in Zukunft in gleichbleibender Qualität und Quantität bewältigen zu können. Die erfahrenen Arbeitnehmer und damit Experten ihres Fachgebietes verlassen die Unternehmen. Mit ihnen droht auch ihr wertvolles Wissen verloren zu gehen.

Um dem entgegenzuwirken sind daher Methoden und Werkzeuge erforderlich, mit denen das Wissen erfasst und nachhaltig dokumentiert werden kann. Das Wissen der Erfahrungsträger soll in einer digitalen Wissensbasis gespeichert werden und für die Mitarbeiter des Unternehmens unabhängig von Personen nachhaltig zur Verfügung stehen.

Die Erfahrungen, die das Expertentum der Mitarbeiter ausmachen, sind nicht fachsystematisch dokumentiert. Es ist nicht allein ihr Fachwissen, das sie zu geschätzten Ansprechpartnern im Unternehmen macht. Ihr besonderes Wissen ist in der Regel implizit, d.h. sie sind sich dessen nicht bewusst, es ist verknüpft mit bestimmten Ereignissen des Berufsalltages [5] [7].

Die Mitarbeiter können dieses Wissen explizieren, indem sie besondere Erlebnisse aus ihrem Arbeitsleben erzählen. Diese Form des Geschichtenerzählens wird durch wissenschaftliche narrative Methoden gestützt, die verschiedene Settings und Vorgehensweisen für die Gesprächsführung liefern. Die bekanntesten dieser Methoden sind das Storytelling [8], Triadengespräche [2] und Interviews.

Die Gespräche werden transkribiert und liegen dann in Form von Textdokumenten vor. Fachexperten müssen nun die Kernaussagen und das zu erhaltende Wissen aus diesen Dokumenten extrahieren. Das Wissen muss dann für die spätere Nutzung aufbereitet werden. Eine Nutzung von langen Textdokumenten, abgelegt in einer Datenbank, ist im Alltag nur begrenzt gebrauchsfähig. Die zunehmende Internationalisierung der Unternehmen macht mehrsprachige oder sprachunabhängige Lösungen erforderlich. Nur so kann das Wissen den Mitarbeitern weltweit barrierefrei und eindeutig zur Verfügung gestellt werden.

Hierfür eignen sich visuelle Lösungen, weil sie:

- das Wissen anschaulich und nachvollziehbar in Form von Bildern, Videos oder Animationen wiedergeben
- weil das Wissen zielgerichtet über die visuelle Repräsentation eines Bauteils oder Arbeitsprozesses abrufbar ist

Die virtuelle Arbeitsumgebung ist eine besondere visuelle Lösung, die über das passive Betrachten hinausgeht und zusätzlich die Interaktion ermöglicht. Eine virtuelle Arbeitsumgebung bietet dem Nutzer ein nahezu realistisches Abbild seiner realen Arbeitsumgebung in Form eines virtuell interaktiven 3D-Modells. Durch die Komplexität der 3D-Modelle und die Möglichkeit der Interaktion kann nahezu jedes Bauteil einer Maschine sichtbar gemacht werden.

Objektspezifische Informationen können an den Bauteilen hinterlegt werden und von den Nutzern gezielt abgerufen werden. Informationen können auch mit Arbeitsprozessen verknüpft werden und so z.B. Zugriff auf Tipps & Tricks der Experten ermöglichen.

2 VR-basierte Wissensbasis

Um eine VR-basierte Wissensbasis in der Organisation erfolgreich einsetzen zu können, muss sie folgende Anforderungen erfüllen:

- die Wissensbasis muss dynamisch sein, d.h. Informationen müssen ergänzt und bearbeitet werden können
- die Mitarbeiter müssen die Informationen in Form von Dokumenten (Fotos, Videos, Texte) vor Ort eigenständig einpflegen können

Beim Aufbau der Wissensbasis werden als grundlegendes Element, neben den Erfahrungen der Mitarbeiter, fachsystematische Informationen (deklaratives Wissen) eingepflegt. Das sind z.B. Informationen zum Aufbau und zur Funktionsweise von Maschinen. Der Aufbau einer Maschine kann in Form einer interaktiven Komponentendarstellung abgebildet werden. Sie erlaubt dem Nutzer das interaktive Erkunden der Maschine mit all ihren Baugruppen, verknüpft mit eindeutigen Bauteilbezeichnungen und zusätzlichen Informationen. Die Nutzung einer Komponentendarstellung eignet sich für jede Maschine, ihre Erstellung sollte daher effizient und teilautomatisiert erfolgen können.

Ein Softwarewerkzeug, das den Erstellungsprozess vollständig abdeckt ist wünschenswert, weil die Nutzung vieler verschiedener Softwareprodukte von den Nutzern spezielles Wissen erfordert und somit die Aktualität und Alltagstauglichkeit der Wissensbasis gefährdet. Die Bauteile, die über die Komponentendarstellung eindeutig identifiziert sind, können mit dem impliziten Wissen der Erfahrungsträger verknüpft werden. So lassen sich die fachsystematisch aufbereiteten Inhalte mit dem Experten- und Erfahrungswissen kombinieren. Der Zugriff auf das Erfahrungswissen kann z.B. über ein objektspezifisches Kontextmenu erfolgen.

3 Stand der Technik Wissensbasis

"Wissensmanagement umfasst […] die Gestaltung der Informationsversorgung und der Entwicklung bzw. Beschaffung, Verteilung und Nutzung von Wissen, mit dem Ziel, dieses im Sinne des Unternehmens zu nutzen." [4] Expertensysteme unterstützen das Wissensmanagement. Die Wissensbasis bildet ein zentrales Element der Expertensysteme. In ihr werden Fachinformationen gespeichert, über die mit Methoden des Wissensmanagements zugegriffen wird. Eine seit vielen Jahren verbreitete Methode ist das »Web 2.0«, das dadurch gekennzeichnet ist, dass die Nutzer auf Inhalte zugreifen können, aber auch selbst zu Autoren werden können. In einer aktuellen Studie [3] wurde untersucht, in welchem Umfang Web 2.0-Lösungen in mittelständischen Unternehmen eingesetzt werden und welche Potenziale die Unternehmen für die zukünftige Nutzung sehen. Aktuell werden Web 2.0-Anwendungen, z.B. Wikis und Blogs, vorwiegend im privaten Bereich eingesetzt. Potenzial sehen die Unternehmen vor allem in der »Verbesserung der Kommunikationsprozesse« und einer »Erleichterung der Informationsbeschaffung«.

An diesen Potenzialen setzt der vorliegende Beitrag an. Wikis basieren in der Regel auf textuellen Dokumenten, ergänzt um Bilder und Videos. Durch die Nutzung virtueller Modelle kann eine solche Wissensbasis um interaktive Elemente erweitert werden. Ein interaktives VR-Modell bietet eine detaillierte und eindeutige Sicht auf die Daten, die die Kommunikation erleichtert, weil alle Beteiligten dasselbe Verständnis haben. Die visuelle Repräsentation ermöglicht einen gezielten Zugriff auf verknüpfte Informationen. Der vorliegende Beitrag adressiert die Domäne der Instandhaltung. In diesem Bereich ist eine detaillierte Kenntnis zum Aufbau der Maschine unerlässlich. Eine Komponentendarstellung ermöglicht es den Instandhaltern, den Aufbau der Maschine strukturiert zu erkunden.

4 Interaktive Komponentendarstellung

4.1 Einsatz und Nutzen

Mit der im vorliegenden Beitrag entwickelten interaktiven Komponentendarstellung kann sich der Nutzer die Baugruppenstruktur einer Maschine durch Interaktion auf Basis gerenderter Bilder erschließen. Ausgangspunkt ist das Bild der Gesamtmaschine (siehe Abbildung 1). Bei Mausbewegung über das Bild werden die Einzelbaugruppen hervorgehoben und die Bauteilbenennung eingeblendet (siehe Abbildung 2). Ein Klick auf die Baugruppe wechselt in diese Baugruppe (siehe Abbildung 3), wo nun erneut die Unterbaugruppen angezeigt und ausgewählt werden können (siehe Abbildung 4).

Die Auswahl der Baugruppen und Bauteile in 2D ist verknüpft mit dem virtuellen Modell, wo die Bauteile ebenfalls markiert werden und dort zusätzlich aus beliebigen Sichten und mit Bezug zum Gesamtsystem angeschaut werden können. Zu allen Bauteilen können objektspezifische Informationen hinterlegt werden, die über ein Kontextmenu abrufbar sind. Diese Form der Darstellung bietet für die betriebliche Nutzung entscheidende Vorteile, weil sie die visuelle Darstellung von Baugruppen und Bauteilen mit den zugehörigen Bezeichnungen eindeutig verknüpft. Das führt im Arbeitsprozess zu einer verbesserten Kommunikation, weil Missverständnisse aufgrund unterschiedlicher Bezeichnungen deutlich reduziert werden.
Im virtuellen Modell kann der Nutzer das Bauteil von allen Seiten betrachten und auf alle Informationen zugreifen, die an diesem Objekt von den Experten hinterlegt wurden. Das können z.B. Tipps und Tricks für die Montage sein oder Bilder aus dem realen Arbeitsprozess.

Abbildung 1: Hauptbaugruppe des Leistungsschalters

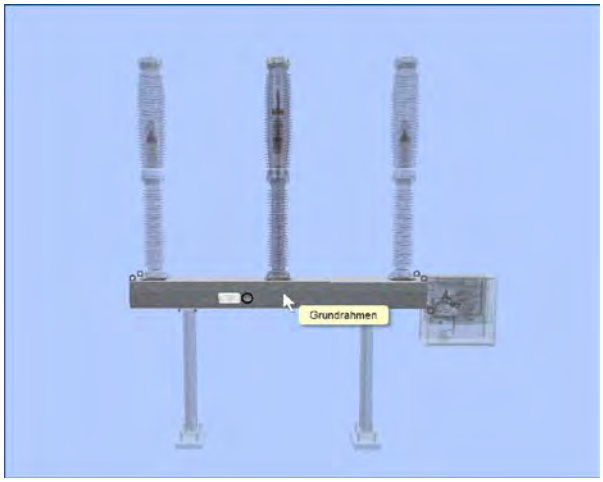


Abbildung 2: Baugruppe »Grundrahmen« hervorgehoben

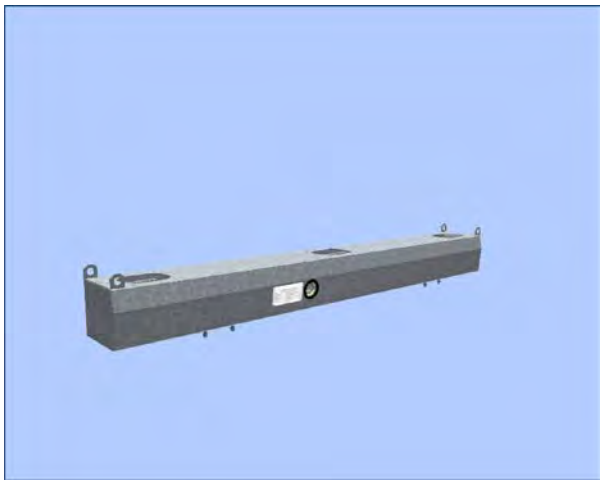


Abbildung 3: Baugruppe »Grundrahmen« ausgewählt

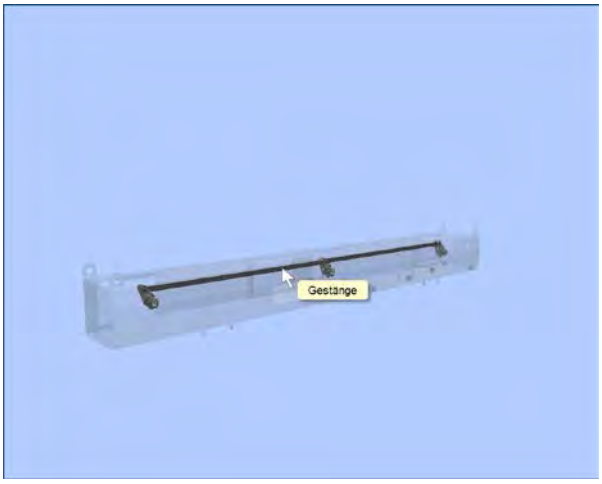


Abbildung 4: Unterbaugruppe »Gestänge« hervorgehoben

4.2 Funktionsanforderungen

Komponentendarstellungen wurden bisher z.B. auf der Basis existierender schematischer Darstellungen oder Explosionszeichnungen entwickelt [1]. Diese wurden in einem Nachbearbeitungsschritt um Zuordnungslinien ergänzt. Um die Darstellungen interaktiv nutzen zu können, mussten in einem weiteren Arbeitsschritt sog. Click-Areas erstellt werden, die dann mit den Darstellungen der ausgewählten Baugruppen verknüpft sind. Abbildung 5 zeigt beispielhaft diese Form der Darstellung.
Diese bisherige Form der Komponentendarstellung weist alle beschriebenen Vorteile einer Komponentendarstellung auf, zeigt jedoch deutliche Defizite im Erstellungsprozess. Viele manuelle Bearbeitungsschritte und die dafür erforderlichen verschiedenen Werkzeuge führen zu einem hohen Zeitaufwand für die Erstellung und erfordern vom Ersteller die Verfügbarkeit und die Kenntnis der verschiedenen Softwarewerkzeuge.

Daher werden an die Erstellung einer interaktiven Komponentendarstellung die folgenden Anforderungen gestellt:

- Der Erstellungsprozess soll durch eine Softwarelösung vollständig realisiert werden können. Funktionen, die von der Software bereitgestellt werden müssen, sind u.a. der Import von CAD-Daten, das Bearbeiten der Baugruppenstruktur und die Verknüpfung der Bauteile mit ergänzenden Informationen.
- Die Erstellung soll weitgehend automatisiert erfolgen.
- Der Erstellungsprozess soll reproduzierbar sein, um bei Änderungen der Modelle die Komponentendarstellung mit geringem Aufwand anpassen zu können.

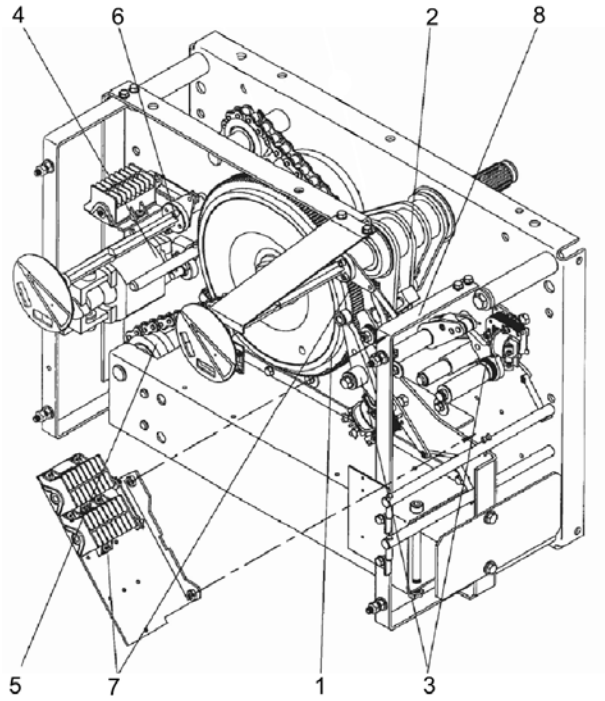


Abbildung 5: Bisherige Form der Komponentendarstellung

Der folgende Abschnitt beschreibt die Vorgehensweise zur Erstellung der Komponentendarstellung, ausgehend von den 3D-Konstruktionsdaten einer Maschine.

4.3 Erstellung der Komponentendarstellung

Die beschriebene Vorgehensweise zur Erstellung einer Komponentendarstellung wird unter Nutzung des 3D-Visualisierungssystems »VDT-Plattform«, entwickelt am Fraunhofer IFF, beschrieben. Die folgenden Arbeitsschritte sind durchzuführen:

1) Import der 3D-Konstruktionsdaten
Die Konstruktionsdaten werden in das Visualisierungssystem importiert. Die aktuelle VR-Hierarchie wird aus den Konstruktionsdaten übernommen. Unterstützte Formate für den Import sind z.B. JT, STEP und VRML.

2) Anpassung der Hierarchie
Die CAD-Hierarchie ist nicht in jedem Fall ideal für die Nutzung in einer Komponentendarstellung. Der Autor kann die originale CAD-Hierarchie daher im nächsten Schritt in die erforderliche Baugruppenhierarchie überführen. Diese unterscheidet sich von der originalen CAD-Hierarchie und einer möglichen Animationshierarchie. Zur Laufzeit des Szenarios kann je nach Anwendung dynamisch zwischen den Hierarchien gewechselt werden.
Für die Anpassung der Hierarchie steht dem Autor eine Tree-Darstellung der Hierarchie zur Verfügung, in der er Knoten einfügen und Objekte und Baugruppen per Drag & Drop neu strukturieren kann.

3) Bilder der Baugruppen und Bauteile rendern
Die Auswahl der Baugruppen und Bauteile soll direkt über Selektion im Bild erfolgen, um zusätzlichen Aufwand zur Erstellung von Zuordnungslinien zu vermeiden. Dazu muss es möglich sein, jeder Position im Bild eindeutig ein Objekt zuordnen zu können.

Eine solche Zuordnung wird durch die Nutzung des Id-Buffers mittels folgender Vorgehensweise möglich:

- Rendern der Szene aus einer definierten Sicht
- Rendern jedes Objektes in einer eindeutigen Farbe, aus derselben Sicht wie die übergeordnete Baugruppe
- Bei MouseOver und Selektion die Mausposition auf dem Gesamtbild ermitteln und mit den farblich codierten Bildern der Einzelobjekte vergleichen. Bei Übereinstimmung ist das Objekt über die Farbe eindeutig zuzuordnen.

Bei dieser Vorgehensweise werden alle selektierten Bauteile erkannt, eine eindeutige Zuordnung ist jedoch nicht möglich. Objekte, die in der gerenderten Baugruppe hintereinander angeordnet sind, haben in den farblich codierten Einzelbildern dieselbe Position.

Eine eindeutige Zuordnung wird möglich, wenn die gesamte Szene farblich codiert gerendert wird. Nachteil bei dieser Vorgehensweise ist, dass verdeckte Objekte nicht ermittelt werden. Die Wahl der geeigneten Vorgehensweise ist erfolgt je nach Anwendungsfall.

Für die Komponentendarstellung ist neben der eindeutigen Objektzuordnung auch eine Hervorhebung der erkannten Baugruppe erforderlich. Eine einfache Hervorhebung wird erreicht, indem die Baugruppe, die dem Objekt übergeordnet ist, transparent dargestellt wird und das Objekt opaque (siehe Abbildung 2 und Abbildung 4). Das automatisierte Rendern der Bilder erfolgt über Makros, welche festgelegte Aktionen nacheinander starten. Für das Rendern eines hervorgehobenen Objektes in der Baugruppe wird folgendes Makros genutzt (siehe Abbildung 6):

```
<actionMakro id="SaveHighlightedObjectPicture"
             node="xPath:@id"
             parent="xPath:../@id">
    <actionMakro id="SetBackgroundColor"/>

    <action type="ObjectHide">
        <param name="Node" type="object" value="WORLD"/>
        <param name="recursive" type="boolean" value="FALSE" />
    </action>

    <action type="ObjectUnhide">
        <param name="Node" type="object" value="@parent"/>
        <param name="recursive" type="boolean" value="TRUE"/>
        <param name="IgnoreParentVisibility" type="boolean" value="TRUE"/>
    </action>

    <action type="ObjectReset">
        <param name="Node" type="object" value="USER"/>
        <param name="recursive" type="boolean" value="TRUE" />
        <param name="Strength" type="int" value="100" />
    </action>

    <action type="ObjectFlyTo">
        <param name="Node" type="object" value="@parent"/>
        <param name="Duration" type="float" value="0"/>
        <param name="EndResponse" type="response" value=""/>
    </action>

    <action type="TransparencySet">
        <param name="Node" type="object" value="@parent"/>
        <param name="Value" type="float" value="0.2"/>
        <param name="Relative" type="boolean" value="false"/>
    </action>
    <action type="MaterialReset">
        <param name="Node" type="object" value="@node"/>
    </action>
    <action type="Screenshot">
        <param name="FileName" type="string"
               value=".\texts\screenshots\|@node|_highlighted.jpg"/>
        <param name="WithMenu" type="boolean" value="FALSE" />
    </action>
</actionMakro>
```

Abbildung 6: Makro zum Rendern eines hervorgehobenen Objektes in der umgebenden Baugruppe

Das Makro setzt zunächst eine gewünschte Hintergrundfarbe in der VR-Umgebung. Es wird dann die gesamte Szene ausgeblendet, bevor die interessierende Baugruppe eingeblendet wird. Bei der Komponentendarstellung werden die Komponenten losgelöst von ihrer Umgebung, z.B. einer Werkhalle, dargestellt. Um eine reproduzierbare Sicht auf die Szene zu erreichen, die für eine spätere eindeutige Zuordnung der Bilder zwingend ist, wird die Position des Nutzers zurückgesetzt und von dieser Position aus ein Sichtflug auf das hervorzuhebende Objekt gestartet. Im Anschluss wird die Szene auf einen Transparenzwert von 0.2 gesetzt und das hervorzuhebende Objekt opaque dargestellt.

Abschließend wird das Bild mit eindeutigem Namen über eine Screenshot-Funktion gerendert. Die beschriebene Form der Hervorhebung zeigt nur eine Möglichkeit, Objekte zu markieren.
Mit Hilfe der Makros werden für die Komponentendarstellung für jedes hervorzuhebende Bauteil die folgenden Bilder gerendert:

- Bild der Oberbaugruppe, alle Objekte sind opaque (siehe Abbildung 1)
- Bild der transparenten Oberbaugruppe und dem hervorgehobenen Bauteil (siehe Abbildung 2)
- ID-Bild der Baugruppe, in dem jedes Bauteil in eindeutiger Farbe gerendert wird (siehe Abbildung 7) oder
- ID-Bild jedes Einzelteils (siehe Abbildung 8)
- Bild des ausgewählten Einzelteils (siehe Abbildung 3)

Abbildung 7: ID-Bild der Baugruppe »Leistungsschalter«

Abbildung 8: ID-Bild der Baugruppe »Grundrahmen«

4) Nutzung der Bilder für die Komponentendarstellung
Die Eingangsdaten der Komponentendarstellung sind in einer xml-Datei gespeichert. Diese enthält die Baugruppenhierarchie, die während der Laufzeit dynamisch hergestellt wird. Außerdem sind Metadaten gespeichert, z.B. die Zuordnung der gerenderten Bilder und die objektspezifisch verknüpften Dokumente.
Über die Hierarchie und die gespeicherten Bilder wird die Anzeige der entsprechenden Bilder bei MouseOver und Klick gesteuert.

5 Zusammenfassung und Bewertung

Mit der beschriebenen Vorgehensweise sind die verantwortlichen Mitarbeiter eines Unternehmens selbst in der Lage Komponentendarstellungen für die verwendeten Maschinen und Anlagen zu erstellen. Voraussetzung ist die Verfügbarkeit der 3D-Konstruktionsdaten.
Nachdem die Baugruppenhierarchie hergestellt und gespeichert ist, erfolgt die Erstellung der Komponentendarstellung automatisiert.

Die Abläufe zum Rendern der verschiedenen Bilder erfolgt über Makros. Somit kann auf Aktualisierungen der Daten schnell reagiert werden und die Komponentendarstellung auf Klick neu generiert werden.

Das ist ein deutlicher Fortschritt gegenüber der bisherigen Vorgehensweise, die durch viele manuelle Handgriffe, z.B. die Erstellung von Zuordnungslinien und das Definieren von Click-Areas, geprägt war.

6 Ausblick

Die für die Komponentendarstellung eingegebenen und zugeordneten Daten können für weitere Anwendungen verwendet werden. Eine Erweiterung um automatisch generierte Lernaufgaben zur Zuordnung von Bauteil und Bezeichnung kann aus den vorhandenen Daten abgeleitet werden. Die Zuordnung kann per Drag & Drop der Bezeichnungen auf den gerenderten Bildern erfolgen. Da die Position der Objekte im Bild bekannt ist, kann sofort eine Aussage getroffen werden, ob die Auswahl korrekt war. Es müssen lediglich aufgabenspezifische Informationen, z.B. das Verhalten bei richtiger oder falscher Zuordnung, ergänzt werden.
Die beschriebene Vorgehensweise wird in laufenden Projekten bereits eingesetzt.

7 Literatur

[1] Beuting, Jürgen; Haase, Tina; Termath, Wilhelm (2010): Qualifizierung von technischen Fachkräften in der Instandhaltung von Hochspannungsbetriebsmitteln mit Methoden der Virtual Reality. In: Lernen & lehren 25 (97), S. 26–33.

[2] Dick, Michael; Braun, Maike; Eggers, Iris; Hildebrandt, Nikolaus (2010): Wissenstransfer per Triadengespräch. Eine Methode für Praktiker. In: Zeitschrift Führung + Organisation 79 (6), S. 375–383.

[3] Fuchs-Kittowski, Frank; Voigt, Stefan (Hg.) (2010): Web 2.0 in produzierenden KMU – Eine empirische und vergleichende Studie über den Einsatz von Social Software in kleinen und mittelständischen Unternehmen des produzierenden Gewerbes. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag.

[4] Gronau, Norbert (Hg.) (2009): Anwendungen und Systeme für das Wissensmanagement. Ein aktueller Überblick. 3. Aufl. Berlin: Gito-Verl (Reihe Wirtschaftsinformatik, 3).

[5] Neuweg, G.H.: Könnerschaft und implizites Wissen – Zur lehr-lerntheoretischen Bedeutung der Erkenntnis- und Wissenstheorie Michael Polanyis, Münster 1999, 3. Auflage 2004.

[6] Perspektive 2025 - Fachkräfte für Deutschland (2011). [Ausg.] Januar 2011. Nürnberg: Bundesagentur für Arbeit.

[7] Schilcher, C.: Implizite Dimensionen des Wissens und ihre Bedeutung für betriebliches Wissensmanagement, Darmstadt, 2006.

[8] Thier, K.: Storytelling. Eine Methode für das Change-, Marken-, Qualitäts- und Wissensmanagement (2010): Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

INVESTIGATION OF LOTION DISTRIBUTION IN WET WIPES BY PORE NETWORK MODEL AND X-RAY MICRO TOMOGRAPHY

Yu Sun, M.Sc.
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Verfahrenstechnik

Dr. Jörg Müller
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Verfahrenstechnik

Dr. Thomas Metzger
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Verfahrenstechnik

Prof. Dr. Evangelos Tsotsas
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Verfahrenstechnik

INVESTIGATION OF LOTION DISTRIBUTION IN WET WIPES BY PORE NETWORK MODEL AND X-RAY MICRO TOMOGRAPHY

Yu Sun, M.Sc., Dr. Jörg Müller, Dr. Thomas Metzger, Prof. Dr. Evangelos Tsotsas, Institut für Verfahrenstechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

1 Introduction

Wet wipes are products of, e.g., baby and skin care. They generally are substrates wetted with washing lotion, where the substrates are typically thin nonwoven sheets made of two or three selected types of fibers, e.g. cotton, rayon and polyester, which have round or trilobal cross sections; and the washing lotion is a water based emulsion, that delivers cleaning and skin-care benefits.

As a commercial product, the development of wet wipes is mainly driven by the consumer expectations. Latest consumer tests [1] consistently show that the top consumer concerns are related to the unexpected lotion gradient of wet wipes in a stack. In order to better understand this issue and prevent it in the early stage of production, many efforts have been made from different aspects, such as lotion properties, fiber blend, and manufacture technology of substrates. By building on this knowledge, Biasutti [2] has developed a one-dimensional capillary model to predict the lotion saturation profile over the whole stack of wet wipes, where the relevant properties of raw material (lotion and substrate), and production settings, such as lotion load, are considered. However, this one-dimensional model has its intrinsic restrictions to represent the liquid connectivity and interface effects. Therefore, the pore network model (PNM) of Metzger et al. [3][4], which is initially used for the drying of capillary porous media, has been introduced and adjusted into this study for a more realistic simulation of substrate.

Pore network modeling was initially introduced by Fatt [5] and applied in petroleum industry. Since then, it has been extensively developed in the field of oil recovery, catalysis, membrane separations, drying of particles or packed beds, and textiles or porous templates. It has become a popular and effective tool to study the flow in porous media. Typically, a pore network model uses pore bodies and pore throats to represent the void space of a material using a simplified geometry, such as a rectangular lattice. Pore bodies often contain most of the pore volume, while pore throats have little or no pore volume and connect the pore bodies. In this study, the authors develop a two-dimensional pore network model in order to study lotion migration in the substrate.

Additionally, a X-ray micro computed tomography (μ-CT) system is utilized to visualize the structure of dry and wet substrate at the micro scale and subsequently, extract characteristics of the microstructure from three dimensional (3-D) images, e.g. pore size distribution.

μ-CT is a non-destructive image technique that scans the sample from a series of projection angles to obtain a set of two-dimensional (2-D) X-ray shadow images, from which a 3-D image can be reconstructed. In our μ-CT system, this process is automatically done by a software: Volex (from the Fraunhofer Institute for Integrated Circuits (IIS)).

2 2-D pore network model

For the sake of simplicity, we begin to model the fibrous substrate as a 2-D rectangular lattice having interconnected pore nodes and throats (see Figure 2). The pore nodes have no mass and volume. They only serve as spatial grid, where the liquid pressures are computed and stored. The pore throats contain all of substrate pore volume. They are cylindrical tubes with uniform length. The radii of these throats are generated according to experimental pore size distributions.

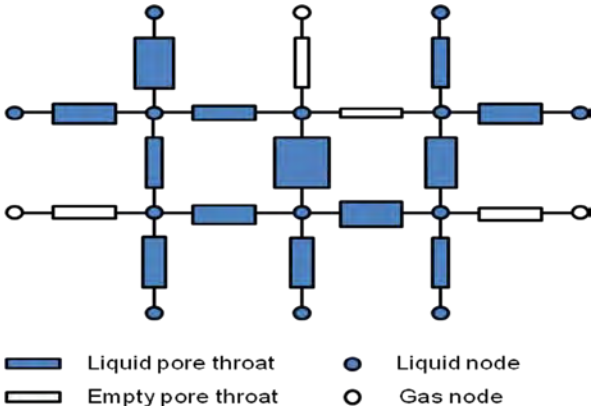


Figure 1: 2-D Pore network with throats and nodes.

The network representing a single layer substrate needs three zones due to varieties in terms of pore size and porosity across the thickness. The core zone of the substrate has densely packed fibers with small pores. The two interface regions consist of loosely packed fibers, i.e. have large pores. The pore size distributions at core and interfaces can be obtained from the X-ray images. Following

Metzger, Tsotsas and Prat [4], the model is simplified by the following assumptions: (1) the air pressure is constant; (2) flow within the pore throats is assumed to be laminar and given by Poiseuille's law and (3) liquid is considered as incompressible. With these assumptions, one can set the governing rules easily, which is the mass conservation at each liquid node in the network.

$$\sum_{j \in N_i} M_{ij} = 0, \qquad i=1,\ldots,N, \tag{1}$$

where N is the number of liquid nodes, M_{ij} represents the liquid mass flow rates from node i to its neighbor node j, and N_i is a list of all neighbor nodes of node i. According to Poiseuille's law, the liquid mass flow rate can be computed from the pressure difference.

$$M_{ij} = g_{ij} \times (P_i - P_j), \tag{2}$$

where P_i represents the pressure at node i; P_j represents (a) the pressure at node j in the case that it is a liquid node and connected to node i by a liquid throat; or (b) the throat potential in the connecting throat between node i and j, in the case that it is not fully filled. Because the throats are cylindrical, the throat potential, denoted as Φ, is computed from Young-Laplace equation

$$\Phi = P_g - \frac{2\gamma \cos\theta}{r_{ij}}, \tag{3}$$

where P_g is the constant air pressure, γ is the surface tension, θ is the contact angle between lotion and substrate, and r is the throat radius. In the equation 2, g_{ij} is introduced as hydraulic liquid conductance in the throat connecting the node i and j and computed as

$$g_{ij} = \frac{\rho \pi r_{ij}^4}{8\eta L_{ij}}, \tag{4}$$

where $0<L_{ij}<1$ is liquid filled length of the throat between nodes i and j, ρ is the mass density of lotion, r_{ij} is the throat radius, η is the dynamic viscosity of lotion. In addition, the empty throats and throats with stationary meniscus have zero liquid conductance. An example is shown (in Figure 3) to demonstrate four typical scenarios in the computation of mass conservation: moving meniscus, stationary meniscus, empty throat and fully filled throat. In the case of throats a and b, the liquid conductance is zero since no liquid flow exits there. Whereas, in the case of throat c and d, liquid flows due to the pressure difference between node 4, node 1 and meniscus in throat d. Accordingly, liquid conductance of throat c and d are considered. By this computation, the liquid pressure at each liquid node is calculated.

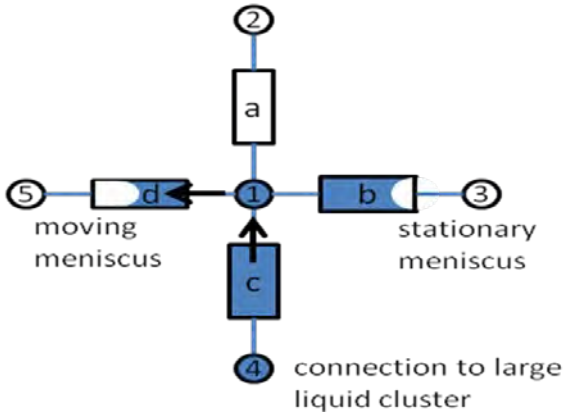


Figure 2: Liquid flow through node 1 with typical scenarios: moving meniscus, stationary meniscus, empty throat and filled throat.

When the pressure filed is known, the occurrence of two discrete events: invasion and receding are decided based on local pressure differences. Invasion means that the liquid enters into an empty throat from a fully filled throat or a liquid node. Receding means that a stationary menisicus in a fully filled throat retreats. Both events have immediate impact on the pressure filed and consequently lead to more possible invasion or receding throats. Therefore, iteration is applied to update the liquid pressure field and accordingly search for all potential invasion and receding throats.

After the decision on invasion and receding, liquid starts to flow continuously until end of the time step. The flow rates of all moving menisci are computed based on the pressure difference between the menisci and their neighbor liquid nodes. The time step is chosen, such that only one throat in the network is emptied or filled at any time step.

Especially, when a throat is emptied, the rest of liquid in this cluster might be stuck due to a special pattern of liquid distribution: closed cycle (see Figure 4 step1). As a simplified example, Figure 4 shows how our PNM solves this problem, where the liquid distributions in three subsequent time steps are presented. The simulation starts with an artificial network and initial liquid distribution (see step 1): throats 2,3,4,5 form a closed liquid cycle and throat 1 has a larger radius than throat 6. As a result, the liquid initially flows from throat 1 to 6. In step 2, the liquid in throat 1 is emptied and the throat 6 is not fully filled yet. This means, without additional mechanism, the liquid in throat 6 cannot further invade, even though it has the capillary potential to do so.

This is because no meniscus is available in this cluster to allow liquid flow and compensate the liquid invasion in the throat 6. In our model, a discrete event check is introduced to create necessary menisci, i.e. a liquid break.

The liquid break check is applied at each time a throat is emptied. If the following two criteria are fulfilled, a liquid connection breaks up and consequently two receding menisci are generated.

– Only one moving meniscus exists in the cluster
– In the current pressure field, there is at least one liquid throat in the cluster, where the throat potential is larger than both pressures at neighbor nodes.

Step 2 shows the break of liquid in throat 4 which has the higher throat potential then throat 2, 3 and 5. In step 3, the liquid flows continuously after the break and liquid in throat 4 is receded to both throat 1 and 6.

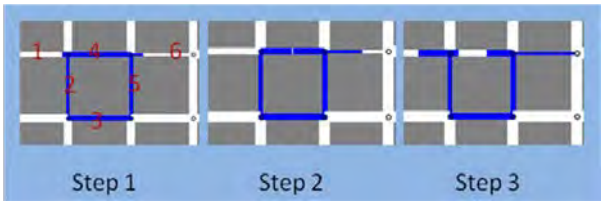


Figure 3: Demonstration of liquid cluster break.

For simulations in this study, properties of lotion and substrate are chosen as those used in the μ-CT measurements.

3 X-ray micro computed tomography

3.1 μ-CT system description

The in-house μ-CT system (see Figure 4) used in the present study is a customized device manufactured by Pro-Con X-ray GmbH, Garbsen, Germany, denoted as CT Procon alpha. It is basically assembled with three parts: X-ray tube, sample tray and detector. The equipped X-ray tube is a transmission one, which generates X-ray beams with maximum capability of 160kV and 1000mA. The sample tray serves to hold the sample and to adjust the sample position accurately on the three spatial axis to have a good view on the detector. Further, during the measurement, the sample tray rotates the sample for taking pictures from different projection angles.

The detector is a flat screen with 2300*2300 pixels, which receives the X-ray beam and translates it to gray value locally at each pixel. The distance between the X-ray tube and the detector is adjustable for maximizing the penetration capability of the X-ray beam. Overall, the resolution of the images taken by this system is maximized in the range of 1μm.

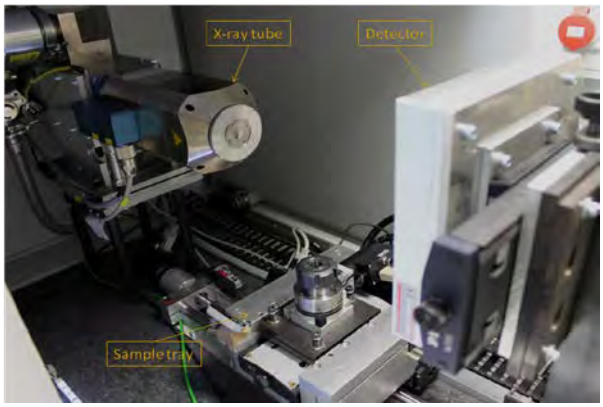


Figure 4: The actual μ-CT system.

3.2 Sample preparation

To prevent sample movement during the test, a sample holder is needed to keep the sample tight on the sample tray and isolated from the air flow. The sample holder should also meet the following three criteria. First, it should be small because the imaging area is limited due to a high required resolution (approx. 4μm in this case), which can resolve the thinnest fibers in the substrates. Second, the sample holder must have thin walls with low density material. Otherwise, it will absorb most of the X-ray beams and hide the substrates in shade. Third, a modular and transparent sample holder is desired for the sake of easy placement of soft substrates.

As a result, a sample holder is built with simple modules: two columns made of polyurethane foam, one transparent plastic straw and one long plastic supporter. In the sample preparation, the dry substrate sheet is cut into small pieces which fit in the straw. After, in the case of wet wipe test, given amount of lotion is applied to the dry substrate. Then, the dry or wet sample is placed in a isolated space created by the two polyurethane foam columns and the plastic straw following the steps shown in Figure 5. Lastly the long plastic supporter is used to keep the sample in the same horizontal level of X-ray tube and fixed in the μ-CT system (see Figure 5).

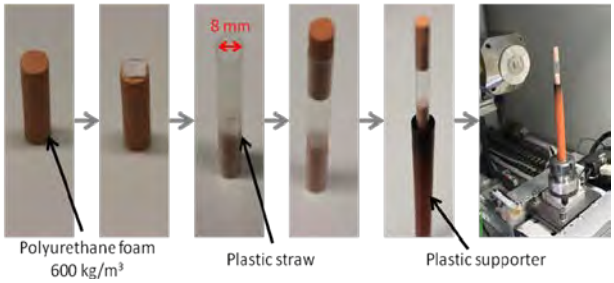


Figure 5: Modular sample holder and the steps to position the samples in μ-CT system.

3.3 Image processing and image analysis

As introduced in section 1, a reconstructed 3-D image is obtained from the X-ray scan. However, this image is not ready to be analyzed because of the complex gray values in the image. Therefore, an image post-processing has to be done, which, in this study, basically contains three steps: crop, binarization and median filter. Crop is to choose the correct image area to be analyzed; Binarization is to separate the image into foreground, which is typically the interested object: fibers in this case, and background, which is all of the other objects in the image; And median filter is a virtual tool to reduce the noise with minimum change of the image. Figure 6 shows the images at each step of the post-processing.

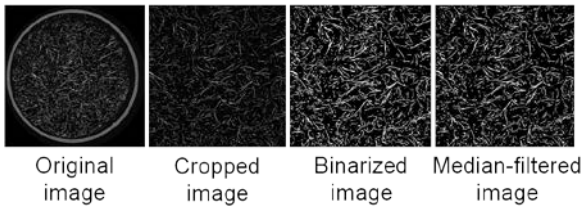


Figure 6: Images at each step of image post-processing.

With the post-processed images, the software: MAVI and GeoDict (from Fraunhofer Institute for Technical and Industrial Mathematics) are used for quantitative analysis. We focus on the two micro structure properties of the substrate: porosity and pore size distribution.
Porosity, also known as void fraction, is the ratio of the volume of void space over the total volume of porous media

$$\Psi = \frac{V_{void}}{V_{total}}. \tag{5}$$

In the dry wipe case, the total volume means the sum of fibers' volume and void volume. Whereas, in the wet wipe case, besides the fiber and void space, the volume of lotion is took into account.

From the definitions of porosities in dry and wet wipes, by assuming the total volume is equivalent in both dry and wet cases, one can derive

$$S = \frac{V_{lotion}}{V_{void}} = \frac{\Psi_{dry} - \Psi_{wet}}{\Psi_{dry}}, \tag{6}$$

where S denotes the lotion saturation.

Pore size distribution (PSD) describes the fraction of the total pore space with pore radii between δ and $r+\Delta r$. It is a dimensionless, volume-weighted distribution. [6] Herein, the pore radius is defined " at any point within the pore space as the diameter of the largest sphere which contains this point and remains wholly within the pore space." by Scheidegger. [7] This distribution will decide the pore throat radii in the PNM.

4 Results and discussion

From X-ray image, the porosity profile and the pore size distribution of our dry sample are obtained and shown in Figure 7 and 8. The obtained porosity profile can be separated in three zones intuitively as introduced in section 2. Core is in the middle with a relatively flat porosity curve ranging from height 0.2mm to 0.4mm. Two interfaces are at the both sides of core. Averaged porosities of these three zones are computed from the profile. In addition, a wet sample was scanned and the averaged porosities of each three zones were computed respectively (see table 1).

With the porosities from X-ray images, one can calculate the saturation of wet sample at each zones (see table 2) following the way introduced in section 3. In the same time, 30 simulations are run with the relevant substrate and lotion properties. The 30 simulated saturations of core and interfaces are averaged respectively to decrease the uncertainties of the randomly given throat radii (see table 2).

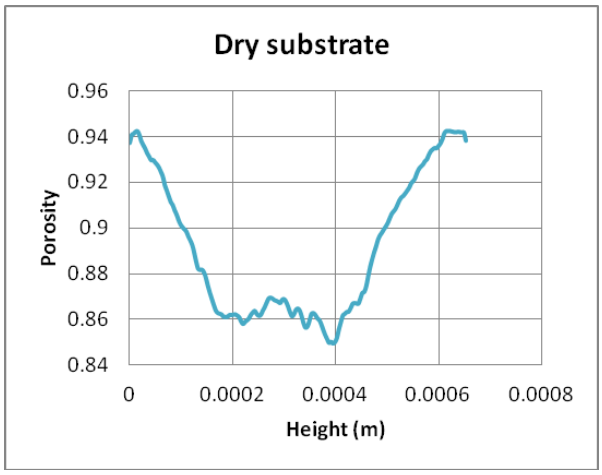


Figure 7: Porosity profile of dry substrate.

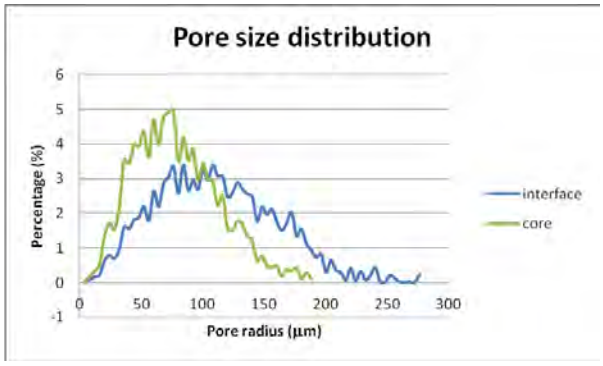


Figure 8: PSD in the core and interface of dry substrate.

	Porosity at top interfae	Porosity at core	Porosity at bottom interface
Dry sample	0.93	0.91	0.94
Wet sample	0.41	0.14	0.56

Table 1: Averaged porosities at core and interfaces in both dry and wet samples.

	top interfae	core	Bottom interface
Saturation from images	0.56	0.84	0.41
Saturation from PNM	0.83	0.93	0.14

Table 2: Averaged porosities at core and interfaces in both dry and wet samples.

In table 2, the simulated saturations show that the lotion, which was initially applied on the top surface of the network, cannot penetrate the network as it does in reality. We believe that this is because of the low pore-connectivity in our 2-D network. This leads to a need for more complex network which is closer to the real structure of substrate, e.g. increasing the coordinate number or using 3-D network.

5 Conclusions

In this paper, we have built a pore network model for the lotion imbibitions to the substrate, where a 2-D regular network is applied. In the network, three zones are defined by their throat radius and average porosity. Lotion was initially applied on the top surface of network. Averaged saturations of each zone were computed at the end of simulation. In parallel, X-ray micro computed tomography was utilized to scan the dry and wet substrate. Porosities and pore size distributions of different zones of the substrate were extracted from the obtained X-ray images. They were used as input parameters to characterize the geometric structure of virtual network. Additionally, porosities were also used to calculate averaged saturation in core and interfaces. The results presented here show an over prediction of liquid saturation in the top interface. We think this is due to the missing third dimension of the pore. Future work will focus on the 3-D network modeling.

6 Acknowledgements

This research project is supported by the research training group (Graduiertenkolleg): "Micro-Macro-Interactions in Structured Media and Particle Systems" of the Otto-von-Guericke University Magdeburg. The X-ray computed tomography is financed by European Fund for Regional Development (EFRD), project number: 1211080002.

7 Reference

[1] P&G, Consumer Research, Schwalbach a.T., 2011.

[2] C. Biasutti, Doctoral Dissertation, Otto-von-Guericke University, Magdeburg, to be published.

[3] T. Metzger, E. Tsotsas, M. Prat, Modern drying technology, vol 1, chapter 2, Wiley-VCH, 2011.

[4] T. Metzger, E. Tsotsas, Viscous stabilization of drying front: Threee-dimensional pore network simulations, vol.86, pp. 739-744, Chemical Engineering Research and Design, 2008.

[5] I. Fatt, The network model of porous media, Petroleum Transactions, AIME, vol. 207, pp. 144-181, 1956.
[6] P.K. Chatterjee, B.S.Gupta, Absorbent technology, pp.13-14, Elsevier, 2002.

[7] A. E. Scheidegger, The physics of flow through porous media, University of Toronto Press, Toronto, 1947.

KOZEPT ZUR MODELLIERUNG EINES SYSTEMS FÜR DIE ANALYSE VON ZUSTANDSDATEN

Dipl.-Math. Annegret Brandau
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Logistik und Materialflusstechnik

KONZEPT ZUR MODELLIERUNG EINES SYSTEMS FÜR DIE ANALYSE VON ZUSTANDSDATEN

Dipl.-Math. Annegret Brandau, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Logistik und Materialflusstechnik

1 Einleitung

Identifikations- und Ortungstechnologien sind in vielen Logistiksystemen integriert und bieten vielfältige Möglichkeiten für ein echtzeitnahes Monitoring von Prozessen und Objekten. Dabei wird eine Flut von Daten generiert, die ohne softwaretechnische Unterstützung nicht mehr zu bewältigen ist. [1, 2, 3] Ein großer Anteil an Softwarelösungen beruht auf Soll-/Ist-Abfragen und generiert Warnungen, wenn Abweichungen auftreten. Zusätzlich unterstützen diese den operativen Logistikplaner bei der Entscheidungsfindung, wenn Abweichungen auftreten. [1, 4]

2 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Forschungsarbeit ist die intelligente Unterstützung der Entscheidungsfindung in kritischen Situationen während des operativen Monitorings eines Logistikhubs. Das hier vorgestellte Konzept dient dazu, das System so zu modellieren und die Daten so aufzubereiten, dass eine intelligente Analyse der Zustandsdaten möglich ist. Darauf aufbauend können dann Methoden der intelligenten Datenanalyse angewendet werden, um zusätzliche relevante Informationen aufzuzeigen, die nötig sind, um eine sinnvolle Entscheidung zu treffen, wenn Abweichungen vom Soll- zum Ist-Zustand auftreten. Dabei steht hier nicht im Fokus Abweichungen in den Zustandsdaten aufzudecken, sondern dem Entscheider die nötigen Informationen zur Entscheidungsfindung bereitzustellen, wie z.B. relevante Informationen über den aktuellen Zustand des Systems, sowie bedeutsame zukünftige Sollzustände. Als Grundlage werden die Modelle und Methoden von [5] und [6] verwendet und weiterentwickelt.

3 Aktueller Stand der Literatur

Aus der Sicht des Supply Chain Managements ordnet sich diese Problemstellung in das Anwendungsfeld des Supply Chain Event Managements (SCEM) ein, dessen Aufgaben zum einen die Vermittlung zwischen dem Planen und Ausführen der Supply Chain und zum anderen die Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit auf Abweichungen sind. [7] In Tab. 1 sind die typischen Phasen des SCEM dargestellt, wobei diese Arbeit ihren Schwerpunkt in der ersten und dritten Phase hat, dem »Überwachen & Erfassen und dem »Melden«.

Phasen	Beschreibung
1) Überwachen & Erfassen (Monitoring & Reporting)	Kontinuierliches Überwachen des Logistiknetzwerks und Erfassen von Daten
2) Identifizieren (Identification)	Identifizieren von Störereignissen und Instabilitäten
3) Melden (Notification)	Unverzügliches Benachrichtigen von Verantwortlichen, Entscheidungsträgern bzw. IT-Systemen
4) Planen & Simulieren (Planning & Simulation)	Simulieren von Handlungsalternativen und "Was-wäre-wenn"- Szenarien
5) Ausführen & Koordinieren (Execution & Coordination)	Ausführen und Koordinieren von Gegenmaßnahmen zur Beheben von Störungen
6) Messen & Bewerten (Measuring & Controlling)	Messen von logistischen Kennzahlen; Untersuchen der Ursachen für Störungen; Auswirkungen auf vor- und nachgelagerte Stufen im Logistiknetzwerk analysieren

Tabelle 1: Phasen des Mobile Supply Chain Event Management nach [8]

Im Bereich des SCEM sind eine Vielzahl an Forschungsarbeiten durchgeführt worden [1, 4, 9], die die Funktionsweisen des SCEM betrachten und den Begriff eines kritischen Ereignisses für Supply Chains definieren. Dabei wird die Modellierung des Systems und die Aufbereitung der Zustandsdaten nicht detailliert betrachtet.
Im Bereich der Produktion gibt es eine Menge an Veröffentlichungen, die sich mit der intelligenten Analyse von Prozessdaten befassen. Als ein Beispiel sei hier das Software-Modul »ProDaMi - Data Mining im Produktionsumfeld« [10] zu nennen, welches Data Mining Methoden auf Prozessdaten der verfahrenstechnischen Produktion anwendet. Hierbei liegt aber der Fokus auf der Identifizierung von Abweichungen und weniger der Bereitstellung von relevanten Informationen zur Entscheidungsfindung.

4 Abgrenzung des Betrachtungsbereichs

Das hier vorgestellte Konzept bezieht sich auf Logistiksysteme, die Umschlagknoten in der Supply Chain darstellen, wie z.B. Flughäfen oder Distributionszentren. Da speziell an diesen Schnittstellen häufig Fehler auftreten wurde der Fokus der Arbeit auf diese Systeme gelegt. Außerdem werden hier nur feste Güter betrachtet und kein Schüttgut. Für das System wird angenommen, dass es mit Identifikations- und Ortungstechnologien ausgestattet ist, die eine Fülle an Zustandsdaten generieren. Damit bezieht sich die Arbeit nicht auf die Planung von Logistiksystemen bei der Einführung solcher Technologien sondern bietet ein Konzept zur Modellierung des Systems um die benötigten Daten zur intelligenten Analyse der Zustandsdaten vorliegen zu haben.

5 Konzept zur Modellierung eines Systems für die Analyse von Zustandsdaten eines Logistikhubs

Das Konzept zur Modellierung eines Systems für die Analyse von Zustandsdaten ist in sechs Schritte untergliedert, siehe Abb. 1. Die ersten beiden Schritte beziehen sich auf das System-, Problem- und Datenverständnis und identifizieren abschließend welche Daten aus dem realen System nicht generiert werden und durch zusätzliche Kausalzusammenhänge ermittelt werden müssen. Diese beiden Schritte werden in dieser Arbeit ausführlich erläutert und an einem Beispiel vorgestellt. Im dritten Schritt werden die generierten Daten des Systems in die aus Schritt 2 resultierende Struktur transformiert und im vierten Schritt analysiert. Schritt 5 dient zur Evaluierung der Methoden und führt abschließend in Schritt 6 zur Anwendung der Analysemethoden auf die Zustandsdaten und der Ergebnisinterpretation. Die Schritte 3-6 sind hier nur zum allgemeinen Verständnis mit aufgeführt, werden aber in dieser Arbeit nicht näher erläutert. Das Konzept ist angelehnt an den CRoss Industry Standard Process for Data Mining (CRISP-DM) [11]. Die Aufbereitung der Daten bzw. das Datenverständnis orientiert sich am Entity-Relationship-Modell [12,13].

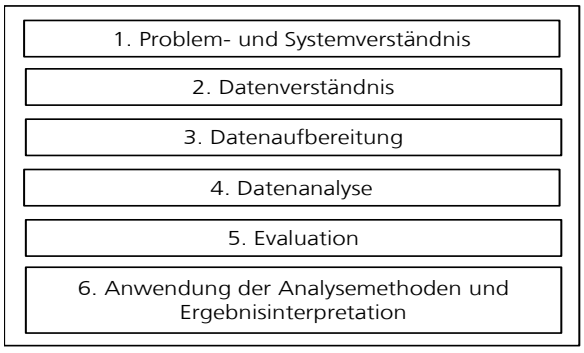


Abbildung 1: Schritte des Konzeptes zur Modellierung des Systems für die Analyse der Zustandsdaten.

5.1 Beispielmodell - Flughafen

Als Beispielmodell dient ein Flughafen, der an verschiedenen Messpunkten mit Identifikations- und Ortungstechnologien ausgestattet ist. Das Modell ist angelehnt an einen realen Flughafen und wurde mittels Tecnomatrix Plant Simulation simuliert. Die Simulation diente zur Generierung der Zustands- und Ereignisdaten.

Es wird angenommen, dass die Luftfrachtcontainer (ULD), Flugzeuge (FLZ), Schlepper (Tug) und Anhänger (Dolly), zum Transport der ULD auf dem Vorfeld, mit Identifikation- und Ortungstechnologien ausgestattet sind. Außerdem werden auch Zustandsdaten der Standflächen der Flugzeuge (Stand) und der Standflächen der Tug und Dolly (Pool) durch Identifikations- und Ortungstechnologien gemeldet. In Tab. 2 sind die Attribute der Objekte angegeben, die mit den Technologien aufgenommen werden.

	ULD	FLZ	Tug	Dolly	Stand	Pool
ID	X	X	X	X	X	X
Zeit	X	X	X	X	X	X
Ort	X	X	X	X		
Status	X	X				
Inhalt		X	X	X	X	X
Temperatur	X					
Erschütterung	X					
Tankfüllstand			X			
Abnutzung			X			

Tabelle 2: Attribute der Objekte, die durch die vorhandenen Identifikations- und Ortungstechnologien gemeldet werden.

5.2 Problem- und Systemverständnis

Um ein System modellieren und analysieren zu können, ist ein umfangreiches System- und Problemverständnis notwendig. Dieses wird mit dem ersten Schritt des Konzeptes erreicht.

5.2.1 Systemstruktur

Zur Darstellung der Systemstruktur, der räumlichen Abbildung der Systemelemente, wird, wie es in der Logistik üblich ist, eine Layout-Visualisierung verwendet. Dabei kann zwischen einem Reallayout, wie Fotos oder CAD-Zeichnungen oder einem Ideallayout wie schematischen Abbildungen gewählt werden.

In Abb. 2 ist ein Ideallayout des beispielhaften Flughafens dargestellt. Das Modell besteht aus einem Warehouse (links unten im Bild), Stands (Standplätze) für die ankommenden und abfliegenden Flugzeuge. Und einem Pool von Tugs und Dollys, die als Schlepper und Anhänger für den Transport der Container vom Flugzeug ins Lager und wieder zum Flugzeug hin, dienen. Die Tankstelle und die Werkstatt für die Tugs liegen direkt neben dem Pool. Die Tugs dürfen aus Sicherheitsgründen die eingezeichnete Fläche in der Mitte zwischen den Stands nicht befahren, diese dient als Fahrweg für die Flugzeuge.

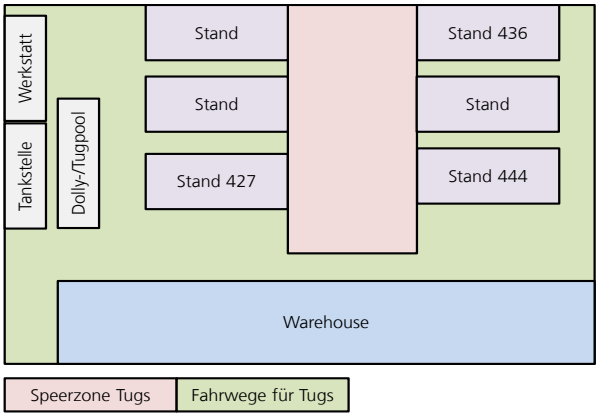


Abbildung 2: Ideallayout des Flughafens

5.2.2 Zieldefinition

Damit die Analyse auch relevante Informationen zum System liefern kann, muss das Ziel des Gesamtsystems klar definiert werden. Da es sich hier um die Modellierung eines Logistiksystems handelt, bietet sich die Zieldefinition nach den »8 Richtigen der Logistik« an, d.h. das Ziel des Systems ist es, die richtige Ware in der richtigen Menge und richtigen Qualität zum richtigen Zeitpunkt mit den richtigen Kosten und den richtigen Informationen ökologisch richtig am richtigen Ort bereit zu stellen.
Die Analyse der Zieldefinition für das Flughafenbeispiel ist in Tab. 3 dargestellt. Daraus ergibt sich, dass hier das Ziel ist, die richtigen ULD-Container in der richtigen Menge mit der richtigen Temperatur und unbeschädigt zum Abflugzeitpunkt im richtigen Flugzeug bereit zu stellen.

8 R der Logistik	8 R im Logistiksystem
Richtige Ware	Richtiger ULD Container
Richtige Menge	Richtige Liefermenge
Richtige Qualität	Richtige Temperatur Unbeschädigt
Richtiger Zeitpunkt	Abflugzeitpunkt des Flugzeugs
Richtige Kosten	Wird nicht betrachtet
Richtiger Ort	Richtiges Flugzeug
Richtige Information	Wird nicht betrachtet
Ökologisch richtig	Wird nicht betrachtet

Tabelle 3: Zieldefinition für das Beispiel

5.2.3 Objekttypen des Systems

Im nächsten Teilschritt des System- und Problemverständnisses wird eine Analyse der Objekttypen durchgeführt. Dabei wird analog [14] unter einem Objekttyp, ein Element des Systems verstanden, welches mit Identifikations- und Ortungstechnologien ausgestattet werden kann, so dass eine Zustands- und Ereignisverfolgung dieses Objekttyps möglich ist. Dabei sind nur die Typen relevant, die zur Überwachung des Systems nötig sind.

Die Einteilung der physischen Objekttypen erfolgt nach »stationär«, »bewegt» und »verschachtelt«, vgl. [5,6]. Dabei bedeutet die Einteilung »bewegt«, dass der Objekttyp über die Zeit seinen Ort wechseln kann. Die Einteilung »verschachtelt« bedeutet, dass der Objekttyp andere Objekttypen enthalten kann.

In Abb. 3 wurde diese Einteilung für das Flughafenbeispiel durchgeführt. Hier ist erkennbar, dass der ULD-Container, der einzige Objekttyp ist, der keine anderen Objekttypen enthalten kann. Dies resultiert natürlich aus der Definition des Hauptziels, da dieser Objekttyp die kleinste betrachtete Einheit ist.

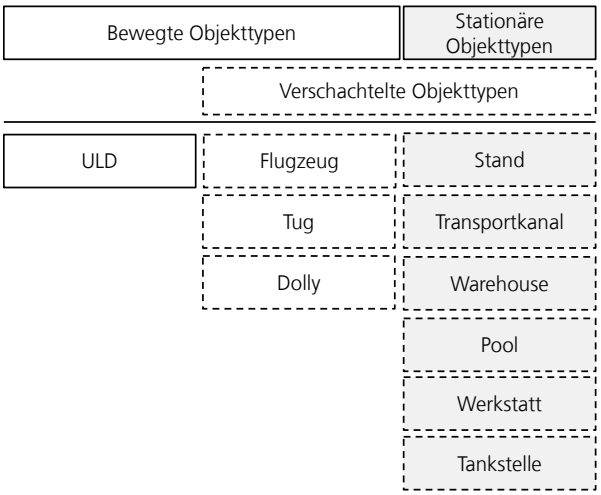


Abbildung 3: Einteilung der Objekttypen des Flughafens.

5.2.4 Prozesse der bewegten Objekttypen

Ein wichtiger Teil zum System- und Problemverständnis liefert die Analyse und Darstellung der Prozesse. Dabei durchlaufen bei hiesigem Verständnis nur die bewegten Objekttypen einzelne Prozessschritte, deren Aggregationsniveau der Experte des Systems definieren muss. Die Prozesse werden als Prozesskette dargestellt und in Verbindung zu den beteiligten Objekttypen gesetzt.
In Abb. 4 ist dies für den ULD-Container beispielhaft dargestellt.

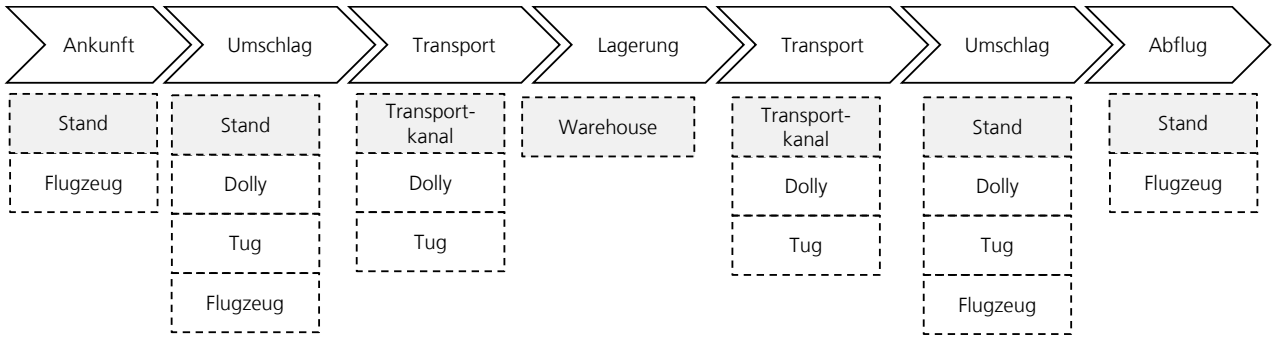


Abbildung 4: Prozesskette für den Objekttyp ULD

5.2.5 Relationen zwischen den Objekttypen

Mit Hilfe der Objekttypeneinteilung und der Beschreibung der Prozesse können die Relationen zwischen den Objekttypen beschrieben werden. Unter einer Relation wird eine Beziehung zwischen den Objekttypen verstanden, analog dem Entity-Relationship-Modell [12,13].
In Tab. 4 ist die Relation »Inhalt« für das Beispiel dargestellt. Es ist ersichtlich, dass nur die verschachtelten Objekte andere enthalten können und auch Hierarchieebenen zwischen den Objekttypen vorherrschen.

Relation »Inhalt«		
Flugzeug	enthält	ULD
Tug	enthält	Dolly
		ULD
Dolly	enthält	ULD
Stand	enthält	Flugzeug
		Tug
		Dolly
		ULD
Transportkanal	enthält	Tug
		Dolly
		ULD
Warehouse	enthält	ULD
Pool	enthält	Tug
		Dolly
Tankstelle	enthält	Tug
Werkstatt	enthält	Tug

Tabelle 3: Darstellung der Relation »Inhalt« für das Beispiel

Mit diesen fünf Teilschritten sind für den Analysten das Problem und das System verständlich und in einer übersichtlichen Form dargestellt. Durch die standardisierte Vorgehensweise kann dies auf jegliche Art von Umschlagknoten angewendet werden. Außerdem kann der Aggregationsgrad beliebig gewählt werden und sollte mit dem jeweiligen Experten des Systems abgestimmt werden.

In diesem Schritt wird ein Vergleich zwischen den Daten, die zum Monitoring des Systems bei dieser Zielstellung nötig sind und denen, die durch die vorhandenen Technologien im System generiert werden, durchgeführt.

5.3.1 Stammdaten und Attribute

Zur Ermittlung aller wichtigen Informationen zu den Objekttypen wird hier zwischen Stammdaten und Attributen unterschieden. Als Stammdaten gelten die Daten, die sich im Laufe der Zeit nicht verändern, wie z.B. Größe, Typ, Kapazität. In Tab. 5 sind mögliche Stammdaten für die Objekttypen des Flughafenbeispiels dargestellt.

Objekttypen	Mögliche Stammdaten
ULD	ULD-Typ
	Abmaße
Flugzeug	Flugzeugtyp
	Kapazität
Tug	Typ des Tugs
	Kapazität
Dolly	Dollytyp
	Kapazität
Stand	Kapazität
Transportkanal	Kapazität
Warehouse	Kapazität
Pool	Kapazität
Tankstelle	Kapazität
Werkstatt	Kapazität

Tabelle 4: Stammdaten aller Objekttypen des Beispiels

Unter Attributen werden die Daten verstanden, die sich im Laufe der Zeit verändern oder mittels Identifikations-, Kommunikations- und Sensortechnologien aufgenommen werden können. Zur Ermittlung der Attribute werden in diesem Konzept drei Teilschritte durchlaufen.
Der erste Teilschritt ist die Ableitung der Attribute aus den »8 Richtigen der Logistik«. Dies muss für jeden Objekttyp durchgeführt werden und ist beispielhaft für den ULD-Container in Tab. 6 dargestellt. Die »Richtigen der Logistik«, die in diesem Zusammenhang nicht betrachtet werden, sind nicht mit aufgeführt.

8R der Logistik	Attribut
Richtige Ware	Identifikationsnummer
Richtige Qualität	Temperatur Erschütterung
Richtiger Zeitpunkt	Zeitstempel
Richtiger Ort	Ort

Tabelle 5: Attribute aus den »8 Richtigen der Logistik« für den ULD-Container

Der zweite Teilschritt bezieht sich auf die zuvor definierten Prozesse der bewegten Objekttypen. Aus diesen werden verschiedene Stati definiert, die die bewegten Objekttypen einnehmen können. Für das Flugzeug aus dem Beispiel könnten diese folgende sein: Landung, Warten auf Stand, Entladen, Beladen, Abflug.
Für die stationären Objekte können auch Stati definiert werden, wie z.B. für das Warehouse die Stati frei und belegt.

Im dritten Teilschritt werden abschließend aus den zuvor identifizierten Relationen Attribute abgeleitet. Im Beispiel wäre es das Attribut »Inhalt«.

5.3.2 Struktur der Zustandsdaten

Aus den zuvor durchgeführten Schritten kann abschließend eine allgemeine Datenstruktur für die Objekttypen abgeleitet werden. Für das Beispiel ist diese in Tab. 7 und Tab. 8 dargestellt.

	ULD	FLZ	Tug	Dolly
ID	X	X	X	X
Zeit	X	X	X	X
Ort	X	X	X	X
Status	X	X	X	X
Inhalt		X	X	X
Temperatur	X			
Erschütterung	X			
Abnutzung			X	
Tankfüllstand			X	

Tabelle 6: Struktur der Zustandsdaten der bewegten Objekttypen

	Stand	Transportkanal	Warehouse	Pool	Tankstelle	Werkstatt
ID	X	X	X	X	X	X
Zeit	X	X	X	X	X	X
Status	X	X	X	X	X	X
Inhalt	X	X	X	X	X	X

Tabelle 7: Struktur der Zustandsdaten der stationären Objekttypen

5.3.3 Ermittlung der fehlenden Daten für die Analyse

Durch die Modellierung wurden Attribute für die Objekttypen ermittelt, die notwendig sind um eine Analyse der Daten durchführen zu können und zu prüfen, ob das System zu jedem Zeitpunkt das vorgegebene Ziel erreicht. Deswegen werden in diesem Teilschritt die Datenstrukturen für die Objekttypen mit den realen verglichen. Dabei treten Unterschiede auf, die entweder durch Kausalzusammenhänge ermittelt werden können oder durch zusätzliche Technologien im System generiert werden müssen.

Durch den Vergleich von Tab. 2 mit Tab. 7 und 8 ergibt sich, dass im realen System des Beispiels die Stati der Tug, der Dolly, der Stands und des Pools nicht aufgenommen werden. Außerdem fehlen Zustandsdaten zur Werkstatt und zur Tankstelle. Hier muss jetzt geprüft werden, welche Stati die vier Objekttypen annehmen können, und ob diese sich über den Ort ermittelt lassen, oder auch über das entsprechende Objekt, das sie enthalten. Bei den fehlenden Zustandsdaten der Werkstatt und der Tankstelle muss mit dem Experten des Systems geklärt werden, ob diese zusätzlich generiert werden müssen, oder die Ermittlung der Inhalte über den Ort der anderen Objekttypen ausreicht.

5.3.4 Definition der Sollzustände und Toleranzgrenzen

Für die Modellierung müssen abschließend die Sollzustände für alle Objekttypen erstellt werden. Diese können z.B. aus den Auftragsdaten und Kundenanforderungen ermittelt werden. Diese sollten zusätzlich mit Toleranzgrenzen hinterlegt werden.

Für das Beispiel wären Sollzustände z.B. Abflugzeiten der Flugzeuge, vorgegebene Werte für die Temperatur und Erschütterung der ULD-Container, Tankfüllstände der Tugs, usw.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Gesamtkonzept vorgestellt, wie ein System modelliert werden kann, um eine anschließende Analyse der Zustandsdaten durchführen zu können. Dazu wurden die ersten beiden Schritte des Konzeptes, die Modellierung des Systems und die Ermittlung der Datenstruktur, detailliert an einem Beispiel vorgestellt. Die Analyse, Evaluierung und Anwendung ist noch in der Entwicklungsphase und wurde aus diesem Grund noch nicht detailliert am Beispiel vorgeführt. Dabei wird aber der Fokus nicht auf der Analyse von Anomalien oder abweichenden Mustern in den Daten liegen, sondern auf der Identifizierung von relevanten Zusatzinformationen,

die nötig sind um eine sinnvolle Entscheidung in kritischen Situationen fällen zu können. Denn nur eine Meldung vom Soll- zum Ist-Zustand oder die Identifizierung einer Anomalie reicht nicht aus, um eine sinnvolle Entscheidung zu treffen.

7 Literatur

[1] Heusler, K. F., Stölzle, W., und Bachmann, H. (2006). Supply Chain Event Management: Grundlagen, Funktionen und potenzielle Akteure. WiSt, 1:24.

[2] Sari, K. (2010). Exploring the impacts of radio frequency identification (rfid) technology on supply chain performance. European Journal of Operational Research, 207(1):174 – 183.

[3] Raab, V., Petersen, B., und Kreyenschmidt, J. (2011). Temperature monitoring in meat supply chains. British Food Journal, 113(10):1267–1289.

[4] Steven, M. und Krüger, R. (2004). Supply Chain Event Management für globale Logistikprozesse: Charakteristika, konzeptionelle Bestandteile und deren Umsetzung in Informationssysteme. In Spengler, T., Voss, S., und Kopfer, H., Hrsg., Logistik Management: Prozesse, Systeme, Ausbildung, S. 179–195. Physica Verlag.

[5] Schenk, M., Tolujew, J., Barfus, K., und Reggelin, T. (2007). Grundkonzepte zu logistischen Echtzeitsystemen: Monitoring, Event Management und Frühwarnung. In-Wolf-Kluthausen, H., Hrsg., Jahrbuch Logistik 2007. free beratung GmbH.

[6] Tolujew, J., Reggelin, T., and Sermpetzoglou, C. (2007). Simulation und Interpretation von Datenströmen in logistischen Echtzeitsystemen. In Engelhardt-Nowitzki, C., Hrsg., Management komplexer Materialflüsse mittels Simulation : State-of-the-Art und innovative Konzepte, Leobener Logistik cases. Dt. Univ.-Verl., Wiesbaden.

[7] Wieser, O. und Lauterbach, B. (2001). Supply Chain Event Management mit mySAP SCM (Supply Chain Management). In Meinhardt, S., editor, Fertigungsmanagement in der Supply Chain, Nr. 219 in HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik. dpunkt-Verl.

[8] Teuteberg, F. (2007). Diffusion und Anwendung von Technologien des Ubiquitous Computing zur Selbststeuerung im Supply Chain Event Management. In Ijioui, R., Emmerich, H., und Ceyp, M., Hrsg., Supply Chain Event Management: Konzepte, Prozesse, Erfolgsfaktoren und Praxisbeispiele, S. 15–35. Physica Verlag.

[9] Bensel, P., Fürstenberg, F., und Vogeler, S. (2008). Supply Chain Event Management. Digitale Schriftenreihe Logistik 3, Technische Universität Berlin, Berlin.

[10] ProDaMi (2012). ProDaMi - Data Mining im Produktionsumfeld. Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung http://www.prodami.de/servlet/is/2240/, 24.04.2012

[11] Chapman, P., Clinton, J., Kerber, R., Khabaza, T., Reinartz, T., Shearer, C., Wirth, R. (2000): Cross Industry Standard Process for Data Mining 1.0, Step-by-step Data Mining Guide. CRISP-DM consortium.

[12] Chen, P. P.-S. (1976). The entity-relationship model toward a unified view of data. ACM Transactions on Database Systems (TODS), 1(1):9–36.

[13] Kemper, A. und Eickler, A. (2011). Datenbanksysteme - Eine Einführung. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 8. Edition.

[14] Scholz-Reiter, B., de Beer, C., Freitag, M., Hamann, T., Rekersbrink, H., und Tervo, J. T. (2008). Dynamik logistischer Systeme. In Nyhuis, P., Hrsg., Beiträge zu einer Theorie der Logistik, S. 109–138. Springer-Verlag.

MOBILITÄTSANALYSE VON ELEKTROFAHRZEUGEN ALS GRUNDLAGE FÜR MOBILITÄTSPROGNOSEN

Dipl.-Inf. Tobias Kutzler
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Logistik- und Fabriksysteme

Dipl.-Ing. Steve Schneider
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Logistik- und Fabriksysteme

MOBILITÄTSANALYSE VON ELEKTROFAHRZEUGEN ALS GRUNDLAGE FÜR MOBILITÄTSPROGNOSEN

Dipl.-Inf. Tobias Kutzler, Dipl.-Inf. Steve Schneider, Logistik- und Fabriksysteme,
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Aufgrund der Zunahme der Mobilität und der weltweit zunehmenden Verknappung fossiler Brennstoffe steigt der Bedarf an neuen Mobilitätskonzepten und neuartigen Fahrzeug- und Antriebskonzepten. Ein Hauptaugenmerk der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten liegt unter anderem auf der Elektromobilität. Die in der Elektromobilität zur Verfügung stehenden Technologien sind jedoch im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren aufgrund ihrer Defizite mit Einschränkungen bei mobilitätsrelevanten Kritierien wie verringerte Reichweite, niedrigere Maximalgeschwindigkeiten oder deutlich längeren Ladezeiten verbunden. Während bei der alltäglichen Mobilität, die durch Fahrten zur Arbeit oder zum Einkaufen und somit kürzeren Strecken repräsentiert wird, keine Veränderungen eintreten, so ist die Verfügbarkeit des Fahrzeugs für längere Strecken oder mehrere aufeinanderfolgenden Einzelfahrten, die in Summe über der Fahrzeugreichweite liegen, deutlich eingeschränkt.

Durch die Einführung von Elektrofahrzeugen entstehen weitere Einflüsse, die nicht auf die Mobilität selbst sondern auf die erforderlichen Infrastrukturen Auswirkungen haben. Eine verbreitete Einführung und Nutzung von Elektrofahrzeugen, wie sie durch die Bundesregierung u.a. bis zum Jahr 2020 mit 1 Mio. Elektrofahrzeugen [1] angestrebt wird, könnte zu einer stärkeren Belastung des regionalen Stromnetzes durch gleichzeitige Ladevorgänge führen. Durch die Bereitstellung und Kommunikation von Mobilitätsanforderungen der Nutzer wird eine effizientere Nutzung der zur Verfügung stehenden Ressourcen und Infrastrukturen u.a. durch eine intelligente Ladesteuerung sowie eine verbesserte Integration erneuerbarer Energien möglich.

1.2 Zielstellung

Um Stabilität der Stromnetze sowie eine grundlegende Mobilität zu gewährleisten, sind eine intelligente Steuerung von Ladevorgängen und eine bedarfsgerechte Bereitstellung von Energie an den jeweiligen Bedarfspunkten (z.B. Ladestationen) erforderlich. Um den Bedarf bestimmen und auch prognostizieren zu können, ist es erforderlich, das Mobilitätsverhalten der Nutzer zu kennen und formal beschreiben zu können. Ziel soll es daher sein, Mobilitätsprofile zur Beschreibung des räumlich sowie zeitlich verteilten Bedarfs von Mobilität und somit einhergehend von Energie mit Hilfe von Mobilitätsanalysen zu erfassen. Mit Methoden der Simulation sollen Prognosen des Mobilitäts- und Energiebedarfs zur Auswahl geeigneter Steuerungsstrategien für Elektrofahrzeuge berechnet werden. Die hierfür notwendigen Simulationsmodelle als auch die Simulationsläufe selbst sollen auf den erfassten Mobilitätsprofilen und -daten basieren. In einem weiteren Anwendungsgebiet können die durch die Mobilitätsanalyse gewonnenen Daten für die bedarfsorientierte Standortplanung von Ladesäulen genutzt werden.

2 Konzeptentwicklung

Im Rahmen des Forschungsprojektes Harz.EE-Mobility war es eine Aufgabe des Fraunhofer IFF eine Methodik zur Mobilitätsanalyse zu erarbeiten. Hierzu wurden die notwendigen technologischen und methodischen Grundlagen identifiziert und zur Anwendung gebracht. Zur Schaffung einer für den genannten Anwendungszweck hinreichende Grundlage werden in einem ersten Schritt die zu erfassenden Daten spezifiziert sowie die notwendigen Datenmodelle zur Speicherung und Abbildung der erfassten Daten erarbeitet. In einem zweiten Schritt wird die Methodik zur Datenerfassung beschrieben.

Zunächst wurden existierende Mobilitätsanalysen bezüglich ihrer Zielsetzung, der dort betrachteten Daten und auf ihre Übertragbarkeit auf das Anwendungsgebiet der Mobilitätsanalyse in der Elektromobilität hin untersucht. Bei der Erarbeitung der für die Beschreibung der Mobilitätsprofile erforderlichen Parameter sind die für das Anwendungsgebiet spezifischen Parameter (z.B. Reichweite, Standzeiten) berücksichtigt worden. Im nächsten Schritt ist ein Datenformat und Verfahren konzipiert worden, mit dessen Hilfe das tägliche Verhalten der Nutzer anonymisiert aufgenommen, zusammengefasst und klassifiziert werden kann.

2.1 Mobilitätsanalysen und Studien

Im Rahmen der Analyse wurden Grundlagen und Methoden zur Erfassung des Fahrverhaltens betrachtet und auf ihre Übertragbarkeit auf den Anwendungsfall der Mobilitätsanalyse für Elektrofahrzeuge überprüft, um die zur Erfassung von Mobilitätsprofilen relevanten und aufzu-

nehmenden Kenngrößen identifizieren und definieren zu können.

Bei der Recherche zu Betrachtungen hinsichtlich des Mobilitäts- bzw. Verkehrsverhaltens innerhalb Deutschlands hoben sich verschiedene Studien hervor. Diese beschäftigen sich im Allgemeinen mit dem Verkehrsverhalten der Menschen im Alltag, wobei teilweise Abgrenzungen vorgenommen werden. Während die Studien »Mobilität in Deutschland« (MID) und das »Mobilitätspanel Deutschland« (MOP) (beide aus den Jahren 2002 [2] [3]und 2008 [4] [5]), sowie die KONTIV 1989 [6] (Vorgänger der MID) und »Mobilität in Städten 2008 – System repräsentativer Verkehrsbefragung« (SrV) [7] sich mit der Erfassung der Mobilität ganzer Haushalte über einen längeren Zeitraum und mit Detailfragen an Stichtagen befassen, beleuchtet die Erhebung »Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland« (KID, ebenfalls 2002) [8] den Wirtschaftsverkehr in Deutschland halterbezogen. Weiterhin wurde die VDE-Studie zu Elektrofahrzeugen [9] aus dem Jahr 2010 analysiert, die sich an die KID 2002 anlehnt.

Die Erhebungen geben einen guten allgemeinen Eindruck über das Verkehrsverhalten in Deutschland. Sie liefern eine gute Grundlage zur Ableitung von relevanten Parametern für die Standortplanung von Ladestellen und die Simulation für Elektromobile, weisen allerdings auch Lücken bezüglich der Umgebung auf, die durch den regional fehlenden Bezug der Erhebungen entstehen. Im Hinblick auf die unterschiedlichen regionalen Gegebenheiten und der täglich zurückgelegten Streckenlänge ist anzumerken, dass eine Schwankung zwischen 30 und 50 Kilometern pro Person und Tag innerhalb der verschiedenen Erhebungen zu erkennen ist. Die Abweichungen können durch methodische Unterschiede in den Auswertungen zustande kommen.

Eine weitere Methode der Mobilitätsanalyse ist die von der The Green & Energy Consulting Group [10] entwickelte Methode unter Berücksichtigung der Parameter Fahrtenhäufigkeit, Energieverbrauch (absolut), Kilometerleistung pro Fahrt (absolut), Ladezustand der Batterie/Geschwindigkeit und Wirtschaftlichkeitsdaten. Die genannten Parameter bilden eine gute Ausgangsbasis für die weitere Auswahl der zur Beschreibung der Mobilitätsprofile benötigten Parameter. Überwiegend finden jedoch absolute Werte Berücksichtigung, mit denen keine Vergleichbarkeit und somit Gruppeneinteilung von Nutzerverhalten möglich ist.

2.2 Parameter

In speziellem Bezug auf den MIV sind für die Standortplanung von Ladestellen durch die Recherche der Studien folgende Anforderungen mit großer Relevanz herausgefiltert worden. Zur Ermittlung eines Zielgebiets und des damit in Verbindung stehenden Abstellpunktes des Fahrzeugs sind dessen geographische Zielkoordinaten zu bestimmen. Desweiteren spielt die Verweildauer des Fahrzeuges am Stellplatz eine wichtige Rolle, da über diese definiert werden kann, ob während der Parkdauer eine Aufladung des Fahrzeugakkus zu realisieren ist. Bei Feststellung eines erhöhten „Kurzparker-Aufkommens" kann dieses bestimmte Gebiet als nicht „Ladestellenrelevant" definiert werden, da eine gehäufte kurze Verweildauer keine Aufladung zulässt. Dieses Ergebnis kann jedoch auch nur bedingt von Bedeutung sein, da die Verweildauern in einem Gebiet von Tag zu Tag oder aber auch von Tageszeit zu Tageszeit variieren können. Aus diesem Grund spielen sowohl der Wochentag und die Tageszeit eine bedeutende Rolle für die Feststellung eines Ladestellenbedarfs in einem Zielgebiet.

Für die Prognose des Verkehrsverhaltens des MIV sind weitere Anforderungen zu betrachten, welche sich aus der Analyse der Studien ergeben. Neben dem Wochentag, der Tageszeit und den Standzeiten der Fahrzeuge sind hierbei auch andere Parameter von Bedeutung. Da anhand der Prognose eine Aussage über den möglichen Energiebedarf des Fahrzeugs am Zielort getroffen werden soll, müssen Daten bezüglich der Streckenlänge und Verkehrsart, aber auch über den Verbrauch erhoben werden. Mit dem Wissen, wieviele Fahrzeuge sich in einem bestimmten Gebiet befinden und welches Verhalten sie in der Vergangenheit hatten, können mit Hilfe einer Simulation, welche das Verkehrsverhalten abbildet, Prognosen über die zu erwartenden Energiebedarfe an den einzelnen Zielorten erstellt werden. Daraus ergeben sich für die Beschreibung der Mobilitätsprofile die Parameter

- Wochentag,
- Tageszeit/Auslösezeitpunkt,
- Streckenlänge,
- Verweildauer,
- Verkehrsart und
- Verbrauch.

2.3 Datenmodell und Parameterklassifizierung

Die durch die Mobilitätsstudien erhobenen Daten werden zwar tabellarisch und grafisch ausgewertet und es wird eine prozentuale Darstellung von Verhältnissen bestimmter Sachverhalte vorgenommen, jedoch bleibt eine Abbildung von komplexem Verkehrsverhalten aus. Es wird keine Verhaltensweise in Abhängigkeit von Zeit, Strecken und Parametern im Zusammenhang dargestellt. Für die simulationsbasierte Prognose ist eine Gruppierung von Mobilitätsdaten durchaus relevant und wird auch im weiteren Kontext mit zusätzlichen Eckdaten benötigt.

Das System der im Folgenden beschriebenen Datenbeschreibung erlaubt eine sofortige Ableitung der erforderlichen Parameter, aber die Auswertung hinsichtlich der Erstellung von Mobilitätsprofilen muss auch hier noch vollzogen werden. Die Informationen, die durch einen Proband erzeugt werden, sind dahingehend nutzbar zu machen, das sie als einheitliche Information – ein »Informationspaket« – vergleichbar mit denen anderer Testpersonen sind. Zu diesem Zweck muss eine Form der Visualisierung gefunden werden, die es ermöglicht Informationspakete zu vergleichen und ähnliche zu einer Gruppe zusammenzufassen. Hierbei muss eine Methode abgeleitet werden, die anhand vordefinierter Parameter Klassifizierungen bereithält. Diese Methode muss idealerweise als Schablone einsetzbar sein, um verschiedene Ausprägungen von Parametern vergleichen zu können.

Ein Instrument, welches den sofortigen Vergleich aufgrund der Schablonenfunktion zulässt, eine übersichtliche Abbildung liefert und leicht anwendbar ist, wird durch den Morphologischen Kasten (MK) beschrieben. Dieser bildet die unterschiedlichen Parameter mit ihren spezifischen Klassifizierungen in einer Einheit ab und kann leicht modifiziert werden, sollten andere Parameter ergänzt oder aber Klassifizierungen ausgetauscht werden.

Zur Wahrung der Übersichtlichkeit ist die Anzahl der Klassen der Parameter im MK auf maximal sieben beschränkt. Aus diesem Grund liegen die Werte für die jeweiligen Parameter nicht in ihren Ursprungsformen aus der Ableitung der Ursprungsdaten vor, sondern sind durch einen Zwischenschritt (Abbildung von Rohdaten auf Inputdaten, siehe 3.2) dahingehend klassifiziert, dass sie in allgemeiner Form vorliegen.

2.3.1 Wochentage

Die Einteilung der Wochentage kann auf verschiedene Weisen vorgenommen werden. Unter anderem besteht die Möglichkeit, die Woche in sieben Tage zur Abbildung eines jeden Tags im MK zu gliedern. Des Weiteren besteht die Option die Einteilung anhand der Verkehrsbelastung der jeweiligen Wochentage durchzuführen. Hierbei werden Tage mit ähnlicher Verkehrsbelastung zusammengefasst. Da die Betrachtung verschiedener Mobilitätsgruppen im Vordergrund steht, ist vor allem unterschiedliches Mobilitätsverhalten zu identifizieren. Aus diesem Grund wird die Klassifizierung der Wochentage auf Grundlage der Verkehrsbelastung durchgeführt.

Bei der Analyse von Verkehrsbelastungsdaten, welche darüber Auskunft geben, an welchen Tagen und zu welcher Uhrzeit die Verkehrslast[1] ihre Spitze erreicht, wurden verschiedene statistische Auswertungen und Studien betrachtet. Tage an denen zu ähnlichen Uhrzeiten eine Spitzenlast aufgetreten ist, werden zu einer Gruppe zusammengefasst. Das Ergebnis der Analyse ist, dass die Wochentage Dienstag bis Donnerstag zusammengefasst werden, während die übrigen vier Tage aufgrund der unterschiedlichen Verkehrsbelastungen für sich allein stehen. Diese Klassifizierung der Wochentage ist, wie in Tabelle 1 dargestellt im Morphologischen Kasten abzubilden.

Wochentag	Mo	Di-Do	Fr	Sa	So

Tabelle 1: Klassifizierung der Wochentage

2.3.2 Tageszeiten - Auslösezeitpunkt

Zur Angabe des Auslösezeitraums, zu der eine Fahrt gestartet wurde, ist es ebenfalls erforderlich, zur Vergleichbarkeit eine Einteilung in Zeitintervalle, die sich über den Tag verteilen, vorzunehmen. Zur Definition der Grenzen dieser Intervalle wurden Verkehrsbelastungen in Abhängigkeit von der Tageszeit betrachtet. Besonderes Augenmerk wurde hierbei auf die verschiedenen Tendenzen in den Verkehrsbelastungen gelegt, um die Übergänge von einem Tagesabschnitt zum anderen zu erfassen. Die Einteilung der Zeitintervalle orientiert sich an den im deutschen Kulturraum üblichen Tagesabschnitten: morgens, vormittags, mittags, nachmittags, abends und nachts.

Im Rahmen der Analyse wurde geprüft, ab und bis wann der Verkehr rapide ansteigt, für einen längeren Zeitraum auf einem bestimmten Niveau bleibt und anschließend abfällt oder insgesamt je Zeitintervall gleichbleibend ist. Die hierbei identifizierten Phasen zeichnen sich also dadurch aus, dass entweder eine Veränderung oder aber eine Beständigkeit des Verkehrsaufkommens diese Phase beschreibt. Die ermittelten Zeitintervalle für jeden Tagesabschnitt sind in Tabelle 2 dargelegt.

Tagesabschnitte	Definierte Zeiten
Morgen	06:00 - 09:00 Uhr
Vormittag	09:00 - 12:00 Uhr
Mittag	12:00 - 14:30 Uhr
Nachmittag	14:30 - 18:00 Uhr
Abend	18:00 - 22:00 Uhr
Nacht	22:00 - 06:00 Uhr

Tabelle 2: Klassifizierung der Tagesabschnitte

2.3.3 Streckenlänge

Basierend auf den in den Studien ermittelten durchschnittlich täglich zurückgelegten Wegelängen und der prozentualen Verteilung an Personen je Kilometerintervall ist eine Einteilung in Wegeintervalle vorgenommen worden. Angelehnt an die MID 2008 und die KID 2002 und der Spanne der durchschnittlichen täglichen Tagesstrecke,

1 Die Verkehrslast beschreibt die Menge an Fahrzeugen, welche zu einer bestimmten Zeit unterwegs sind.

die durch die unterschiedlichen Studien gegeben wird, ist die Streckenlänge in kurz, mittel, lang und überlang eingeteilt. Bei der exakten Klassifizierung der Streckenlängen wurden im Rahmen des Projektes neben der begrenzten Reichweite eines Elektrofahrzeugs und der durchschnittlichen Entfernungen in der Modellregion Harz auch die in Studien definierten Grenzen berücksichtigt und ermöglichen somit eine spätere Vergleichbarkeit der eigens erhobenen Werte. Somit sind die in Tabelle 3 dargestellten Streckenintervalle und Klassen definiert worden. Elektrofahrzeuge weisen auf derzeitigem Stand der Technik im Durchschnitt eine zugesicherte Reichweite von 100 Kilometern auf, welche sich in den folgenden Jahren steigern soll. Hierzu wird es erforderlich sein, Anpassungen an der Klassifizierung vorzunehmen, welche jedoch jederzeit möglich sind.

Streckenlänge	Kurz	Mittel	Lang	Überlang
Grenzwerte (km)	0-10	10-50	50-100	ab 100

Tabelle 3: Klassifizierung der Streckenlänge

2.3.4 Standzeit & Verweildauer

Die Verweildauer der Elektrofahrzeuge an einem Abstellpunkt spielt ebenfalls eine Rolle, da je nach Aufenthaltslänge an einem Ort eine Entscheidung darüber getroffen werden kann, ob ein Aufladen der Fahrzeugakkus realisierbar ist. Die zur Verfügung stehenden Lademöglichkeiten fordern unterschiedliche Ladezeiten. Während der Akku beim Ladevorgang an einer Haushaltssteckdose (230Volt) ca. sechs bis acht Stunden benötigt, ist bei Nutzung eines Starkstromanschlusses (400 Volt) eine Verkürzung der Ladezeit auf zweieinhalb Stunden möglich. Da ein Fahrzeug laut MID 2008 insgesamt ca. 94 Prozent des Tages steht, sind Verweildauern von acht bis 10 Stunden und darüber hinaus denkbar. Durch Steierwald werden typische Verweildauern von MIV-Nutzern beschrieben, die ebenfalls im Zusammenhang mit den Elektromobilen ihre Gültigkeit beibehalten. Dieser Sachverhalt lässt es auch zu, dass der Elektromobilnutzer sein Fahrzeug dem Smart Grid zur Verfügung stellen kann, welches das Elektrofahrzeug als mobilen Energiespeicher für regenerativ erzeugte Energieüberkapazitäten nutzt. Auf Basis der verschiedenen Lade- und Standzeiten werden die Zeitintervalle zu den Verweildauern, wie in Tabelle 4 dargestellt, definiert.

Verweildauer	Kurz	Mittel	Lang	Dauer
Grenzwerte	0-2 h	2-6 h	6-10 h	ab 10 h

Tabelle 4: Klassifizierung der Verweildauer

2.3.5 Verkehrsart

Als weiterer Faktor wird die Verkehrsart betrachtet, welche ebenso wie die Streckenlänge den Verbrauch beeinflusst und durch verschiedene Merkmale charakterisiert ist. Hierbei kann es sich um Stadtverkehr oder aber auch um Überlandverkehr handeln. Während beim Stadtverkehr unter anderem verdichteter Verkehr, Ampelverkehre, Stop-and-Go-Verhalten und die langwierige Parkplatzsuche auftreten, läuft der Überlandverkehr üblicherweise fließend und hat einen niedrigen Anteil an Ampelverkehren und Stop-and-Go-Verkehren. Weiterhin kann davon ausgegangen werden, dass im Überlandverkehr höhere Geschwindigkeiten gefahren werden als im Stadtverkehr - nicht zuletzt aus Gründen der Straßenverkehrsordnung.

Bei der Entscheidung, ob eine Strecke im Überland- oder Stadtverkehr oder in Kombination beider Varianten überwunden wurde, wird eine Gewichtung herangezogen. Wurde ein Fahrzeug überwiegend innerhalb einer Stadt bewegt, wird die Fahrt der Klassifizierung »Stadt« zugeordnet, während die Zuordnung »Überland« bei Fahrten mit hohem Anteil außerstädtischer Bewegungen vorgenommen wird. Ist das Verhältnis ausgeglichen ist die Zuordnung »Kombination« zu wählen. Die folgende Tabelle beschreibt die Grenzwerte der Anteile an Stadt- und Überlandfahrten zur Klassifizierung.

Verkehrsart	Stadt	Überland	Kombination
Gewichtung	> 70% Stadt < 30% Überland	< 30% Stadt > 70% Überland	30%-70% Stadt 30%-70% Überland

Tabelle 5: Klassifizierung der Verkehrsart

2.3.6 Verbrauch

Für die Darstellung des Verbrauchs im Morphologischen Kasten muss eine Klassifizierung gefunden werden, die jeden Fahrzeugtyp und somit auch verschiedene Antriebskonzepte (Verbrennungsmotor/Elektromotor) abbilden kann. Somit kann die Mobilitätsanalyse auch auf der Grundlage von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor durchgeführt werden und zur Prüfung der Eignung eines Elektrofahrzeugs zur Abdeckung des individuellen Mobilitätsverhaltens genutzt werden. Weiterhin ist es zur Vergleichbarkeit des Nutzerverhaltens über verschiedene Antriebskonzepte und auch Fahrzeug- und Leistungsklassen hinweg erforderlich, eine von absoluten Größen unabhängige Klassifizierung zu wählen. Aus diesem Grund wurde die prozentuale Abweichung vom Normverbrauch des Fahrzeugs gewählt, die für jedes Fahrzeug bestimmt werden kann.

Somit ist darstellbar, dass je nach Strecke, Umweltbedingungen oder Nutzer unterschiedliche Verbräuche auftreten können. Die Klassifizierung des Verbrauchs erfolgt somit wie in Tabelle 6 dargestellt.

deutlich niedriger	< -50%
niedriger	-50% bis -25%
etwas niedriger	-25% bis -0,1%
Normverbrauch	0%
etwas höher	0,1% bis 25%
höher	25% - 50%
deutlich höher	> 50%

Tabelle 6: Verbrauchsklassifizierung

3 Von der Datenerfassung zum Mobilitätsprofil

3.1 Datenerfassung

Die Erfassung der für die Mobilitätsanalyse erforderlichen Rohdaten erfolgt mit Hilfe der Telematiklösung des Fraunhofer IFF, die die Aufzeichnung von Abfahrts- und Abstellorten und -zeiten sowie Verbrauchsdaten ermöglichen. Aus den genannten Daten werden im Telematiksystem weitere Daten wie die gefahrene Distanz, Fahr- und Stillstandszeiten sowie Durchschnittsverbräuche berechnet. Die Ermittlung der Verkehrsart erfolgt über einen georeferenzierte Abgleich der Fahrzeugkoordinaten der jeweiligen Strecke. Hierbei werden die Koordinaten anhand im System vorliegender Stadtflächen als innerstädtisch oder außerstädtisch klassifiziert und anschließend die Kilometer ermittelt, die innerhalb und ausserhalb von Stadtgrenzen liegen. Auf Basis der jeweiligen Streckenanteile kann die Einteilung in Stadt- und Überlandfahrt erfolgen.

Die Aufzeichnung erfolgt mit in Fahrzeugen installierten GPS-Loggern, welche über eine mobilfunkbasierte Schnittstelle die Daten an ein zentrales System übermitteln. Dieses System speichert die erfassten Daten und übernimmt die weitere Berechnung und Auswertung der Daten. Weiterhin bietet das System Funktionalitäten, die erfassten und berechneten Daten entweder weiteren Anwendungen zur Verfügung zu stellen (z.B. Web Service Schnittstelle) oder einem Nutzer über ein User-Interface den Zugriff auf die Daten zu ermöglichen.

3.2 Klassifizierung und Erzeugung von Mobilitätsprofilen

Die Nutzbarmachung der Mobilitätsdaten zur Darstellung im Werkzeug, dem Morphologischen Kasten, kann auch als Umwandlung der Rohdaten in Inputdaten für den MK verstanden werden, die in Abbildung 1 verdeutlicht wird. Die einzelnen Klassifizierungen der Parameter wurden in vorangegangenen Abschnitten aufgezeigt. Die in der Abbildung verwendeten Mobilitätsdaten sind mit Hilfe der Telematiklösung des Fraunhofer IFF im Rahmen des Projektes Harz.EE-Mobility erhoben worden. Diese Daten liegen als Rohdaten vor und bieten nur unter Umwandlung in Inputdaten eine Grundlage zur Vergleichbarkeit untereinander. Anhand von vier Parametern wird in Abbildung 1 die Umwandlung von Rohdaten zu Inputdaten sowie die Zuordnung zu einer Klassifizierung dargestellt. Um den Wochentag als Parameter einer Klassifizierung zuzuordnen, muss dieser zunächst über einen Kalenderabgleich ermittelt werden. Für die Bestimmung von Fahrtbeginn und Verweildauer müssen die Zeiten abgeglichen und berechnet werden, um diese einer Klasse zuzuordnen. Der Parameter Streckenlänge kann den Daten entnommen werden, in Inputdaten umgewandelt und dann der Klassifizierung zugeführt werden.

Abbildung 1: Verfahren zur Auswertung der Mobilitätsdaten

Sind alle Parameter erfasst, können sie anhand der Klassifizierungen in den MK übertragen werden. Mit Hilfe diese Schablone können Mobilitätsgruppen gebildet werden, die eine gemeinsame Gesamtausprägung des MK haben und damit ein bestimmtes Profil liefern. Der vollständige MK mit einer beispielhaften Ausprägung ist in Abbildung 2 dargestellt.

Wochentag	Montag	Die - Don	Freitag	Samstag	Sonntag			
Auslösezeitraum	Morgen	Vormittag	Mittag	Nachmittag	Abend	Nacht		
Streckenlänge	kurz	mittel	lang	überlang				
Verkehrsart	Stadt	Überland	Kombination					
Verbrauch	< -50 %	-50% - -25%	-0,1% - -25%	0%	0,1% - 25%	25% - 50%	> 50%	
Verweildauer	kurz	mittel	lang	dauer				

Abbildung 2: Morphologischer Kasten mit beispielhafter Ausprägung

Der MK wird als Abbildungs- und Vergleichselement für die aufgenommenen Mobilitätsdaten der Elektromobile verwendet. Im MK werden die vorher modifizierten Mobilitätsdaten als Gesamtheit visualisiert, d.h. als abgeschlossene Einheit abgebildet, sodass eine Vergleichsebene geschaffen wird, und deren Vergleichsprozess durch die Schablonenfunktion des MK unterstützt wird.

Da ein Nutzer nicht nur ein explizites Mobilitätsverhalten hat, werden aus dem individuellem Nutzerverhalten für einen Nutzer mehrere MKs erzeugt, die das Nutzerverhalten repräsentieren. Aufgrund der Schablonenfunktion können nun scheinbar unterschiedliche Rohdaten, die in einem oder mehreren MKs abgebildet werden, zum Vergleich ähnlicher Morphologien und somit zur Gruppenbildung herangezogen werden. Die Gruppenbildung erfolgt

durch Zusammenfassung von Nutzern, deren Morphologieausprägungen einen je nach Anwendungsfall zu definierenden Überdeckungsgrad besitzen. Besitzt bspw. ein Nutzer aufgrund seines Mobilitätsverhaltens 20 Morphologien, so könnte bei einer Festlegung des Überdeckungsgrads von 80% eine Gruppenzugehörigkeit ausgewiesen werden, wenn andere Nutzer bei mindestens 18 Morphologien die gleiche Ausprägung besitzen.

3.3 Mobilitätsprognose

Die Ermittlung des prognostizierten nutzerspezifischen Verhaltens kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. Die im Rahmen des Projektes realisierte Onlinesimulation nutzt ein Stufenmodell zur Auswahl des zum Nutzer passenden Mobilitätsprofils. Primär erfolgt die Nutzung des nutzerindividuellen Mobilitätsverhaltens basierend auf der Historie des Nutzerverhaltens. Kann keine Aussage über ein individuelles Mobilitätsverhalten getroffen werden, so erfolgt die Prognose basierend auf dem Mobilitätsverhalten der Gruppe, der der Nutzer aufgrund seines Verhaltens zugeordnet ist. Die Gruppenzugehörigkeit erfolgt durch den Abgleich des Nutzerverhaltens (=Vergleich der Morphologie). Ist auch hier keine Prognoseermittlung möglich, so wird die Prognose des Verhaltens basierend auf dem Verhalten der Allgemeinheit ermittelt. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass aufgrund der Berücksichtigung der Allgemeinheit das Eintreten des prognostizierten Nutzerverhaltens erheblich unwahrscheinlicher ist.

4 Zusammenfassung

Die vorgestellte Methodik ist im Rahmen des Projektes Harz.EE-Mobility zur Schaffung der Datengrundlage für die Online-Simulation zur Ermittlung der Prognose des Mobilitätsverhaltens angewendet worden. Hierbei wurden in Probandenfahrzeugen Komponenten des Telematiksystems installiert und in einer anschließenden anonymisierten Form Daten erhoben. Die Aktualisierung des Datenbestands, der daraus ermittelten Mobilitätsprofile sowie die Berechnung der Prognosen ist im Projekt realisiert worden. Der hierdurch entstehende Datenfluss ist in der Abbildung 3 dargestellt.

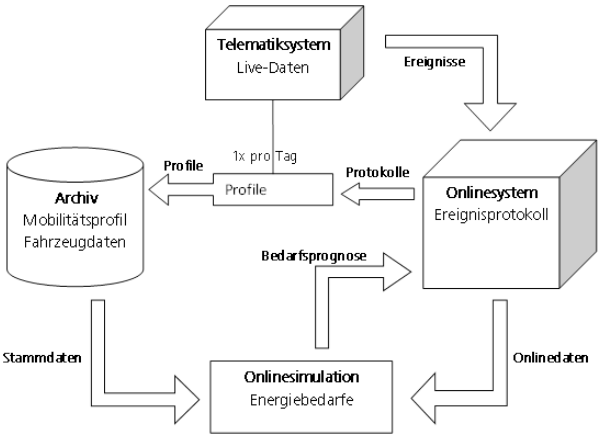


Abbildung 3: Datenfluss im Onlinebetrieb zur Prognoseberechnung

Weitere Anwendungsgebiete für den gewählten Ansatz der Mobilitätsanalyse und Datenaufnahme ist auf andere Anwendungsbereiche in der Logistik übertragbar.

So können mit Hilfe der vorgestellten Methodik Materialflussanalysen basierend auf Prozessdaten durchgeführt werden. Hierbei müssen jedoch andere Parameter definiert werden, die im Rahmen einer Prozess- und Bedarfsanalyse (bezogen auf den gewünschten Einsatzzweck) ermittelt werden können. Die prinzipielle Vorgehensweise besteht jedoch darin, nach erfolgter Definition zu erfassender Rohdaten eine Abbildung in eine einheitlich beschreibbare und vergleichbare Form vorzunehmen.

5 Literaturverzeichnis

[1] Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität, Berlin: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), 2011.

[2] R. Vollmer, U. Kunert, J. Kloas und H. Kuhfeld, „Mobilität in Deutschland," infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Bonn, Berlin, 2002.

[3] D. Zumkeller, B. Clond und T. Kuhnimhof, „Mobilitätspanel Deutschland 2002," Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2002.

[4] R. Follmer, D. Gruschwitz, B. Jesske, S. Quandt, B. Lenz, C. Nobis, K. Köhler und M. Mehlin, „Mobilität in Deutschland 2008," infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Bonn, Berlin, 2008.

[5] D. Zumkeller, B. Chlond, P. Ottmann, M. Kagerbauer

und T. Kuhnimhof, „Deutsches Mobilitätspanel 2008 - Zwischenbericht," Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2008.

[6] EMNID GmbH und Co. (Bielefeld) und EMNID GmbH und Co. KG., „KONTIV 1989: Bericht zur Methode," EMNID-Institut, Bielefeld, 1989.

[7] G.-A. Ahrens, F. Ließke, R. Wittwer und S. Hubrich, „Endbericht zur Verkehrserhebung "Mobilität in Städten - Srv 2008"," Technische Universität Dresden, Dresden, 2009.

[8] IVS Institut für Verkehr- und Stadtbauwesen, Technische Universität Braunschweig,

„Kontinuierliche Befragung des Wirtschaftsverkehrs in unterschiedlichen Siedlungsräumen - Phase 2, Hauptstudie," Braunschweig, 2003.

[9] J. Böcker, M. Bösing, M. Bredehorn, W.-R. Canders, B. Cebulski, P. Doetsch, R. d. Doncker, O. F. Kashani und et. al., „VDE-Studie Elektrofahrzeuge - Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf Studie erstellt von VDE ETG Taskforce Elektrofahrzeuge," VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., Frankfurt am Main, 2010.

[10] Green & Energy GmbH, „Green & Energy - Produkte - Mobilitätsanalyse," Green & Energy, [Online]. Available: http://www.green-and-energy.com/de/leistungen-und-produkte/mobilitatsanalyse/. [Zugriff am 12 April 2012].

DIGITAL ENGINEERING IN KMU – PLANUNGSPROZESSE BEDARSFGERECHT TECHNOLOGIEBASIERT UNTERSTÜTZEN

Dipl.-Ing. Stefan Leye
Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Virtuell Interaktives Training

DIGITAL ENGINEERING IN KMU – PLANUNGSPROZESSE BEDARFSGERECHT TECHNOLOGIEBASIERT UNTERSTÜTZEN

Dipl.-Ing. Stefan Leye, Virtuell Interaktives Training, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF

1 Einleitung

Die Globalisierung der Märkte und ein damit verbundener starker Wettbewerb, schneller technologischer Fortschritt und eine große Produktvielfalt stellen produzierende Unternehmen fortwährend vor neue Herausforderungen. Gerade für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) ist es existenziell, dynamische Veränderungen im Unter-nehmensumfeld rechtzeitig zu erkennen und darauf mit geeigneten Maßnahmen zu reagieren. Digital Engineering (DE) versetzt Unternehmen in die Lage, über eine einheitliche Datennutzung entlang des Produktlebenszyklus diese Flexibilität zu erlangen.

2 Motivation und Zielsetzung

Heutzutage wird deutschlandweit die Produktentstehung bereits in 80% der Großunternehmen technologiebasiert unterstützt. Wichtige Zielgrößen sind hierbei [1]:

- Verkürzung der Time-To-Market
- Wirtschaftlichkeit der Produktherstellung
- hohe Produkt- und Fertigungsqualität
- Realisierung flexibler Prozessgestaltungen
- Optimierung der internen Kommunikation
- Wissenserwerb und -erhalt

Demgegenüber greifen lediglich 5% der KMU auf digitale Planungs- und Simulationswerkzeuge zurück. Dabei sind diese durchaus bereit, im Zuge eines Prozesswandels ihre Produktentwicklung und Produktion technologiebasiert zu unterstützen. Die Gründe hierfür liegen vorrangig in den speziellen Randbedingungen von KMU, wie beispielsweise beschränkte Investitionsmöglichkeiten sowie fehlendes Know-how im Digital Engineering.

Ziel der in diesem Artikel vorgestellten Forschungsarbeit ist es, ein bedarfsgerecht skaliertes Softwarewerkzeug für Planungs- und Qualifizierungsprozesse der Produktmontage konzeptionell zu entwickeln. Dieses soll direkt auf die speziellen Anforderungen und Anwendungsfälle einzelner KMU zurechtgeschnitten werden. Durch eine einfache Gestaltung digitaler Ablaufpläne sowie einer schnellen Generierung von Animationen der Arbeitsab-läufe in einer virtuell interaktiven Umgebung, soll die Verknüpfung von Arbeitsplanung und -durchführung unterstützt werden.

3 Grundlagen

Analysen der anfallenden Herstellungskosten haben ergeben, dass gerade im Montagebereich die Produktion von Industriegütern Rationalisierungspotentiale aufweist [1]. Vergleicht man nach Abbildung 1 die Produktionskosten hinsichtlich ihrer Entstehung und Verantwortung, wird deutlich, dass der überwiegende Teil der Kosten innerhalb der Montage anfällt. Die Gründe hierfür liegen jedoch hauptsächlich in der vorgelagerten Konstruktion [2].

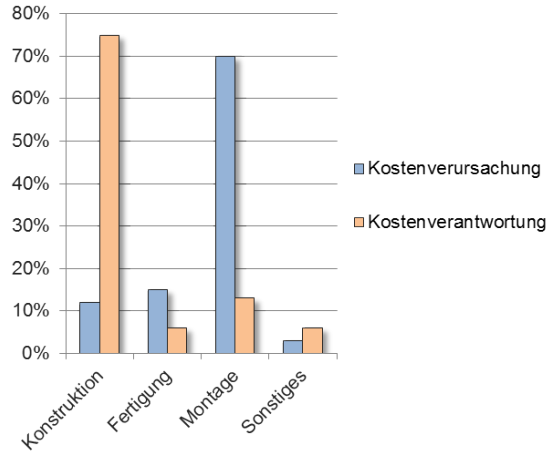


Abbildung 1: Kostenverursachung und -verantwortung nach [2]

Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer teilprozessübergreifenden Produktentstehung, auf Basis einer strukturierten Koordination und Kommunikation im Unternehmen. Hierzu bedarf es einer ablauforganisatorischen Neustrukturierung von Entwicklung, Planung und Herstellung. Als zentrales Bindeglied verknüpft hierbei die Technische Produktionsplanung Produktentwicklung und Produktion.

3.1 Technische Produktionsplanung

Innerhalb der Produktionsplanung ist die Arbeitsvorbereitung von besonderer Bedeutung. Diese setzt sich aus den Teilbereichen der Arbeitsplanung und Arbeitssteuerung zusammen (siehe Abbildung 2). Unterschiedliche Sichtweisen kommen dabei in den zwei Bereichen zum Tragen. Im Rahmen der Arbeitsplanung, welche in Abhängigkeit der Auftragsauslösung unterschiedliche

Arbeits-pakete beinhaltet, steht die ingenieurswissenschaftliche Herangehensweise im Vordergrund. Betriebswirtschaftliche Aspekte prägen hingegen die Produktionsplanung und -steuerung als ganzheitliches Planungs- und Kontroll-organ.

Abbildung 2: Arbeitsvorbereitung nach [3]

Um eine klare Abgrenzung beider Teilbereiche bezüglich ihrer Aufgaben innerhalb der Produktionsplanung zu gewährleisten, wird die Technische Produktionsplanung wie folgt definiert: »Die Technische Produktionsplanung beinhaltet alle einmalig auftretenden Planungsmaßnahmen, die das räumliche und zeitliche Zusammenwirken von Mensch und Betriebs- bzw. Arbeitsmittel vorbereitet und sicherstellt« [4].

Somit ist der Oberbegriff für die Planung der Produktion in speziellen Unternehmensbereichen wie der Teilefertigung, dem Rohbau und der Montage formuliert. Wie bereits beschrieben, entsteht ein Großteil der Produktentstehungskosten im Bereich der Montage. Um Rationalisierungspotentiale in diesem Unternehmensbereich zu lokalisieren und den Einsatz computerunterstützter Systeme effektiv zu planen, ist ein grundlegendes Verständnis der Vorgänge innerhalb der Montageplanung erforderlich.

3.2 Montageplanung

Innerhalb der Montageplanung werden Montageabläufe und -einrichtungen für eine effektive Produktion von Unternehmensgütern geplant. Im Rahmen einer variantenreichen Serienproduktion entsteht hier beispielsweise eine Großzahl der Varianten. Des Weiteren müssen in der Montage, als letztes Glied im Produktentstehungsprozess, sämtliche Störungen aus vorgelagerten Unternehmens-bereichen kompensiert werden [5]. Gleichzusetzen mit einem »Sammelbecken aller organisatorischen, termin-lichen und qualitativen Fehler der Produktionskette« [6].

So gesehen stellt die Montageplanung innerhalb der Technischen Produktionsplanung das entscheidende Brückenglied zwischen Produktentwicklung und Produktion dar.

Die Montageplanung ist ein Vorgang, »mit deren Hilfe ein technisches System gebildet wird, das in der Lage ist, eine vorgegebene Montagetätigkeit unter Erfüllung bestimmter Randbedingungen durchzuführen« [7]. In diesem Zusammenhang wird das Montieren als »die Gesamtheit aller Vorgänge, die dem Zusammenbau von geometrisch bestimmten Körpern dienen (definiert, Anm. des Verf.)« [8]. Im Kern der Montage stehen dabei die Operationen des Fügens nach DIN 8593 sowie die Vorgänge der Werkstückhandhabung nach VDI-Richtlinie 2860. Hinzu kommen das Justieren und das Prüfen, inklusive weiterer Sonderoperationen wie das Markieren, Erwärmen, Kühlen oder Reinigen [2] (siehe Abbildung 3).

Abbildung 3: Operationen des Montierens nach [2]

Der Einsatz rechnerunterstützter Methoden und Werkzeuge soll Unternehmen hinsichtlich der Produktionsplanung in die Lage versetzen, effizienter und zielgerichteter auf die dynamischen Veränderungen am Markt zu reagieren. Die Effizienz der unternehmensinterne Koordination und Kommunikation bzgl. Planung und Ausführung von Produktions- und Montageprozessen soll gesteigert werden.

4 Stand der Technik

Die Integration von IT-Werkzeugen zur Unterstützung der Technischen Produktionsplanung wird sowohl von universitären Forschungsprojekten als auch von kommerziellen Anbietern forciert. Bisher eigenständig existierende
Lösungen der Rechnerunterstützung – sogenannte Insel-lösungen – sollen hierbei miteinander verknüpft werden. »Dabei beeinflussen sich wissenschaftliche Forschung und softwaretechnische Umsetzung stark« [9].

4.1 3-Phasen-Modell

Das methodische Vorgehen erfolgt diesbezüglich in drei grundlegende Phasen. Während in der ersten Phase Grundlagen für eine integrierte Montageplanung durch universitäre Forschungsprojekte geschaffen werden,

liegt der Fokus der zweiten Phase in der Umsetzung der prototypischen Software bei verschiedenen Anwendern. Die gewonnenen Erfahrungen fließen bei kommerziellen Softwareanbietern wie z.B. Siemens® und DELMIA® ein.

In der dritten Phase, gilt es die am Markt erhältlichen, etablierten Systeme systematisch weiterzuentwickeln [9]. Inhaltlich gilt es Prozessplanungswerkzeuge mit Ablauf-simulationen zu verknüpfen, eine Parallelisierung von Produktentwicklung und Produktionsplanung anzustreben sowie die Montageplanung hinsichtlich ihrer computertechnischen Unterstützung zu optimieren.

4.2 Anforderungen der KMU

Die Unterstützung der Montageplanung durch Werkzeuge des Digital Engineerings schreitet demnach stetig voran. Seitens der KMU gibt es jedoch eine Reihe an speziellen Randbedingungen, welche den Einsatz von Methoden und Werkzeugen des DE behindert. Hohe Investitionskosten für Softwarebezüge und die notwendige Schulung ihrer Anwender, knappe personelle Ressourcen hinsichtlich qualifizierter Mitarbeiter für Prozessplanung sowie die bisher nicht direkt auf die Bedürfnisse von KMU zurechtgeschnittenen Softwarewerkzeuge, verhindern die Anwendung des Digital Engineering [4].

KMU zeigen daher besondere Anforderungen an das Digital Engineering. Diesbezüglich werden Voraussetzungen zur Integration der Methoden und Werkzeuge in KMU definiert [10]:

- Skalierung hinsichtlich des Anwendungsgebietes
- Nutzung bereits im Unternehmen vorhandener Software
- Angepasster Funktionsumfang der neuen digitalen Werkzeuge
- Begleitende Einführung im Unternehmen

Die Implementierung der anwendungsspezifischen Werkzeuge erfordert weiterhin ein langfristig orientiertes Überarbeiten der unternehmensinternen Prozesse und Strukturen.

In diesem Zusammenhang wird das sukzessive Durchlaufen der Phasen der Vorbereitung, Konzeptionierung und Umsetzung angestrebt. In der Vorbereitungsphase gilt es, die Anwendungsgebiete mit dem größten Rationalisierungspotential zu ermitteln sowie einen Ist-Zustand dieser Bereiche hinsichtlich bereits eingesetzter IT-Werkzeuge und genereller Prozessgestaltung zu ermitteln. Daraus können notwendige Softwarewerkzeuge und deren Funktionsumfang abgeleitet werden. Die Anpassung der Aufbauorganisation und der bereits vorhandenen Systemarchitektur an die neuen Rahmenbedingungen ist Inhalt der Konzeptphase. In Pilotprojekten werden die Adaptionen praktisch erprobt, bevor diese stufenweise in der Um-setzungsphase im Unternehmen eingeführt werden [11].

Je strukturierter der Einsatz der digitalen Methoden und Werkzeuge erfolgt, desto größer ist das Nutzenpotential im Produktentstehungsprozess. Die Einführung bedeutet zu Projektbeginn einen Mehraufwand einzusetzender Planungsressourcen, dem gegenüber erhebliche Ressourceneinsparungen am Projektende stehen [4]. Abbildung 4 stellt die genannten Abhängigkeiten zur Aufwandsverlagerung durch das Digital Engineering grafisch dar. Hier wird aufgezeigt, dass eine Verlagerung des zu betreibenden Arbeitsaufwands in frühe Stadien der Produktentstehung – im Zuge des DE ist darunter u.a. der Mehraufwand für die Datenverwaltung zu verstehen –, einen Zeitgewinn in der Produktion mit sich bringt.

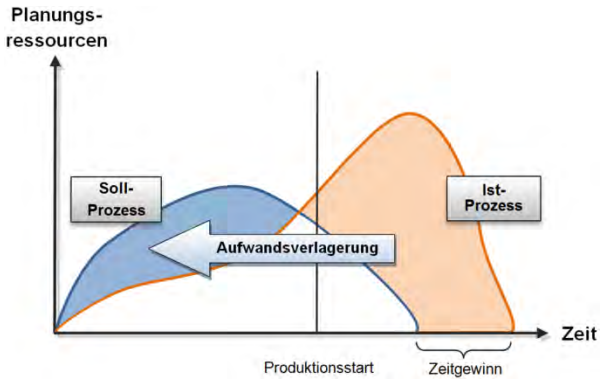


Abbildung 4: Ressourcenaufwand mit Digital Engineering [4]

Für KMU kommt hierbei dem Pilotprojekt eine besondere Bedeutung zu, da in diesem erste wichtige Erfahrungen mit den neu einzusetzenden IT-Werkzeugen gesammelt werden. Des Weiteren können eventuell erforderliche An-passungen an der Vorgehensweise der Einführung und dem geplanten Umfang der IT-Unterstützung abgeleitet werden. Im Rahmen der weiteren Arbeit wird sich dabei auf die Unterstützung der Montageplanung durch Techniken der Virtuellen Realität konzentriert.

5 Konzeption

Grundlegend gilt es, zu Beginn vertiefend auf konzeptionelle Aspekte der Montageplanung in einer virtuell interaktiven Umgebung einzugehen. Es sind Anforderungen und Zielsetzungen an die VR-Anwendung aufzustellen. Diese sind Basis der weitergehenden Betrachtung des Umfangs und der Umsetzung der Anwendung, welche sich auf die VDT-Plattform – ein am Fraunhofer IFF Magdeburg entwickeltes VR-Visualisierungssystem – stützt.

Neben der vereinfachten Erstellung eines Montageplans in einer virtuellen Umgebung, steht dabei die visuelle Unterstützung der Montagetätigkeiten durch Animationsabläufe in der Virtuellen Realität im Fokus. Dazu wird ein Grundkonzept des Anwendungsaufbaus erarbeitet, welches die VDT-Plattform als Basiselement um

6 Realisierung

Für die Umsetzung der Konzeption kommen im Rahmen dieser Forschungsarbeit verschiedene Entwicklungswerkzeuge zum Einsatz. Zur Implementierung der notwen-digen Systemerweiterung in die VDT-Plattform

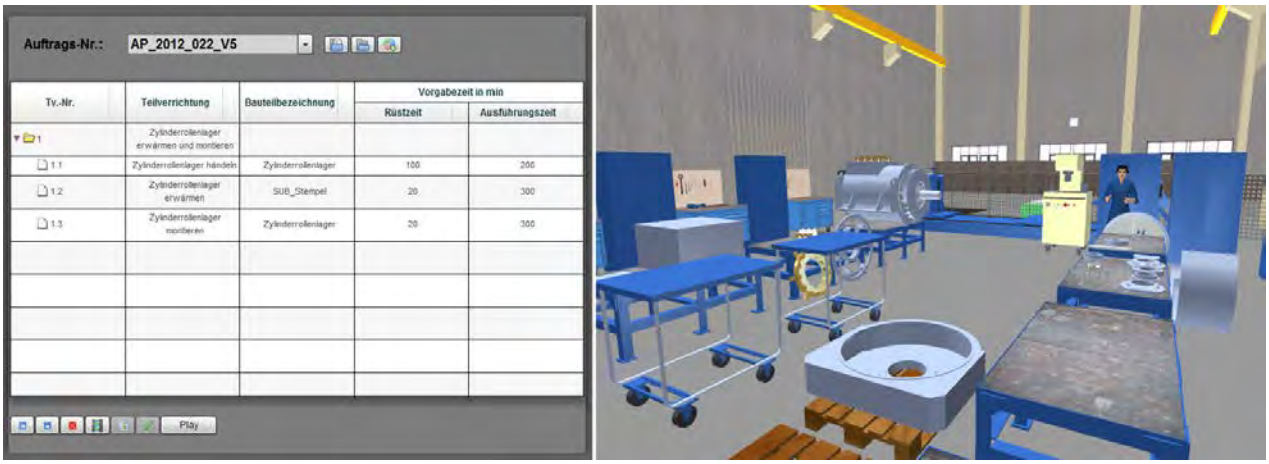


Abbildung 5: Benutzungsoberfläche (links) und virtueller Montagebereich (rechts)

eine entsprechende Benutzungsoberfläche erweitert (siehe Abbildung 5). Wichtigstes Ziel hierbei ist neben dem einfachen Anlegen von Montageplänen, Objektanimationen teilautomatisiert erstellen zu können. Hierzu werden von der Bedienungsoberfläche sämtliche Animationsreferenzen automatisiert generiert.

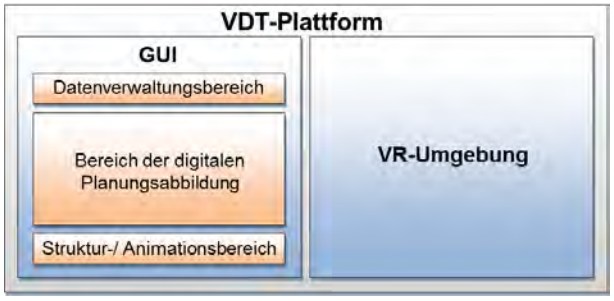


Abbildung 6: Grundlayout der Benutzungsoberfläche

Die Aufgabe des Anwenders besteht darin, den Animationspfad manuell durch Wegpunkte zu definieren. Um eine flexible Layoutgestaltung gewährleisten zu können, ist die Benutzungsoberfläche nicht als direkte Systemerweiterung der VDT-Plattform konzipiert. Das GUI wird über eine JavaScript-Schnittstelle als externe Anwendung in das VR-System geladen. Zur Wahrung einer funktionsfähigen Datenverbindung zwischen VR-System und Benutzungsoberfläche wird eine neue Systemerweiterung, auch als Plug-in bezeichnet, konzipiert. Durch sie sind Anweisungen vom GUI zur VDT-Plattform sowie Infor-mationsübertragungen in umgekehrter Richtung möglich.

kommt Visual Studio® 2005 – eine Entwicklungsumgebung für höhere Programmiersprachen – von Microsoft® zum Einsatz. Für die Benutzungsoberfläche wird Adobe® Flex® als Entwicklungsframework eingesetzt. Es ermöglicht grafische Oberflächen über die XML-basierte Auszeichnungssprache MXML schnell und variabel zu gestalten und darüber hinaus die Möglichkeit, einzelnen Komponenten der Bedienungsoberfläche speziell erstellte Funktionen über die Programmiersprache ActionScript zuzuweisen.

6.1 Virtuell interaktive Umgebung

Die Planung der Arbeitsschritte erfolgt in einer vereinfachten digitalen Abbildung eines Montagebereichs (siehe Abbildung 6). In der virtuellen Montagebereich sind Werkzeuge sowie Betriebs- und Hilfsmittel für die Produktmontage enthalten.

Die 3-D-Bauteile werden aus einer CAD-Bibliothek in das VR-System geladen. Materialien werden den digitalen Modellen für ein reales Erscheinungsbild zugewiesen. In der virtuellen Arbeitsumgebung werden die Einzelbauteile entsprechend ihrer Ausgangslage zu Montagebeginn durch den Anwender platziert.

6.2 Benutzungsoberfläche

Innerhalb der konzipierten VR-Anwendung ist die grafische Benutzungsoberfläche (siehe Abbildung 7) als die Interaktionsschnittstelle zwischen Anwender und VDT-Plattform anzusehen. Hier werden Eingaben des Nutzers in Anweisungen an das VR-System umgewandelt, Informationen empfangen und ausgewertet, Daten verwaltet sowie grafisch dem Anwender ausgegeben.

So wird beispielsweise direkt über die GUI der digitale Arbeitsplan erstellt und verwaltet. Es werden Komponenten in der VR-Umgebung mit Ablaufinformationen verknüpft und gleichzeitig Metadaten der Komponenten im Ablaufplan hinterlegt.

Um dem Anwender eine einfache Interaktion mit dem Laufzeitsystem zu ermöglichen, sollte das Design der Benutzungsoberfläche überschaubar, flexibel in der Anwendung sowie intuitiv in der Bedienung sein. Dazu wird das GUI in drei wesentliche Bereiche unterteilt, welche im Rahmen der Konzeptionierung in Abbildung 5 dargestellt wurden. Dies sind die Bereiche der Datenverwaltung, der Montageplanerstellung sowie der Struktur- und Anima-tionserstellung.

Im Bereich der Datenverwaltung erfolgt die Administration der Montageplanung. Hier werden neue Pläne angelegt, erstellte Pläne in einer Speicherdatei abgelegt sowie bereits existierende Pläne eingeladen. Zentrales Element des Bereichs der Montageplanerstellung ist die digitale Abbildung eines Ablaufplans – zu verstehen als eine Tabelle mit Sonderfunktionen – inklusive verschiedener Schaltflächen für die Planstrukturierung. Dieser beinhaltet alle für eine Montage benötigten Arbeitsanweisungen. Die Realisierung der Animationserstellung und deren Einbindung erfolgt im Struktur- und Animationsbereich.

Hierbei generieren Systemroutinen teilautomatisiert sämtliche Systemfunktionalitäten, welche zum Abspielen von Objektanimationen in der VDT-Plattform benötigt werden.

Für die manuelle Verknüpfung von Objekten und Wegpunkten zu definierten Animationspfaden sind drei Schaltflächen erforderlich. Diese befinden sich direkt neben den Interaktionsknöpfen der Planstrukturierung. In der Buttonbar (siehe Abbildung 7) befinden sich, aufgezählt von links nach rechts, neben den drei Schaltflächen der Planstrukturierung jeweils ein Knopf für das Starten einer Animationserstellung, ein Knopf für die Aufnahme eines Wegpunktes (als Momentaufnahme bezeichnet) sowie ein Knopf zum Beenden der Animationsbeschreibung.

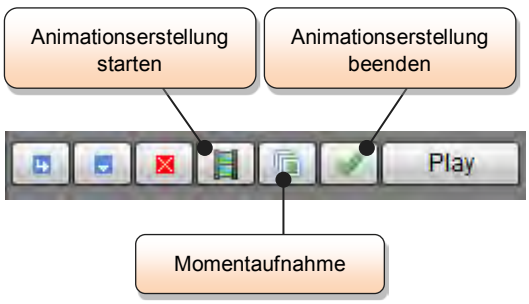


Abbildung 7: Buttonbar der Benutzungsoberfläche

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Fokus dieser Arbeit steht die technologiebasierte Unterstützung der Produktionsplanung von KMU durch Techniken des Digital Engineerings. Es werden grundlegende Betrachtungen von Potentialen und Herausforderungen bei der Einführung des Digital Engineering in KMU durchgeführt. Darauf aufbauend wird eine VR-Anwendung für eine virtuell interaktive Arbeitsplanung konzeptionell entwickelt. Belastbare Daten aus der Produktentwicklung, in Form von CAD-Daten, dienen hierbei im Rahmen der Produktionsplanung zur Vorbereitung der Endmontage.

Mithilfe des entwickelten Werkzeuges wird ein Planungsingenieur am Bildschirmarbeitsplatz in die Lage versetzt, VR-gestützt die Arbeitsplanung durchzuführen und parallel dazu den vorhandenen Arbeitsbereich virtuell zu überprüfen. Es wird die Möglichkeit geboten, digitale Ablaufpläne einfach zu gestalten sowie Animationen der notwendigen Arbeitsschritte schnell in diesen zu integrieren. Die Planungsergebnisse werden digital dokumentiert und können im Anschluss an den Planungsprozess für die Qualifizierung des Montagepersonals weiterverwendet werden.

Die in diesem Artikel vorgestellte VR-Anwendung birgt Potentiale für Weiterentwicklungen. Für eine durchgängige Projektdokumentation ist das Überführen des digitalen Plans in ein druckfähiges Dateiformat sinnvoll. Digital erstellte Pläne können folglich auf Papier vervielfältigt und archiviert werden. Für eine projektgebundene Archivierung ist das Abspeichern der Arbeitspläne, zusammen mit anderen spezifischen Projekt- bzw. Produktdaten, in separaten Speicherdateien erforderlich. Auf diese Weise wird eine konsequente Datenverwaltung unterstützt. Zur weiterführenden Unterstützung der Arbeitsplanung ist eine automatisierte Zeitauswertung der geplanten Handlungsabläufe notwendig. Auswertungen der Zeitanteile einzelner Teilschritte am Gesamtmontageprozess unterstützen eine ökonomische und zielführende Kopplung von Produkt, Prozess und Ressource.

8 Literatur

[1] Bös, Mathias.: Methoden der Digitalen Fabrikplanung – ein praxisnaher Ansatz für KMU. In: Rabe, Markus (Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logis-tic Applications – Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2008, S. 407-415.

[2] Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.).: Montage in der industriellen Produktion – Ein Handbuch für die Praxis. Hannover: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

[3] Eversheim, Walter: Organisation in der Produktionstechnik 3 – Arbeitsvorbereitung. Düsseldorf: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2002.

[4] Zenner, Christian: Durchgängiges Variantenmanagement in der Technischen Produktionsplanung. Universität des Saarlandes, Dissertation, 2006.

[5] Schimke, Ernst-Friedrich: Montageplanung. Methoden, Fallbeispiele, Praxiserfahrung. Düsseldorf: VDI Verlag, 1994.

[6] Westkämper, Engelbert; Bullinger, Hans-Jörg; Horváth, Peter; Zahn, Erich (Hrsg.): Montageplanung – effizient und marktgerecht. Stuttgart: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2001.

[7] Bley, Helmut; Fox, Matthias: Entwicklung eines featurebasierten Konzepts zur Montageplanung. In: VDI-Berichte 1171: Serienfertigung feinwerktechnischer Produkte – von der Produktplanung bis zum Recycling. S. 231-250, Düsseldorf: VDI Verlag, 1994.

[8] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2860: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Düsseldorf: VDI Verlag, 1990.

[9] Rudolf, Henning: Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie. Technische Universität München, Dissertation, 2006.

[10] Schack, Rainer Jürgen.: Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik. Technische Universität München, Dissertation, 2007.

[11] Bracht, Uwe; Geckler, Dieter; Wenzel, Sigrid: Digitale Fabrik – Methoden und Praxisbeispiele. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2011.

SICHERUNG EINER ZUKUNFTSTRÄCHTIGEN VERKEHRSINFRASTRUKTUR FÜR DEN LOGISTIKSTANDORT DEUTSCHLAND

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Fabian Behrendt
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Logistik und Materialflusstechnik

Dr.-Ing. Sebastian Trojahn
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Logistik und Materialflusstechnik

Dr. rer. nat. Karl-Heinz Daehre, Minister a.D.

SICHERUNG EINER ZUKUNFTSTRÄCHTIGEN VERKEHRSINFRASTRUKTUR FÜR DEN LOGISTIKSTANDORT DEUTSCHLAND

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Fabian Behrendt; Dr.-Ing. Sebastian Trojahn, Insitut für Logistik und Materialflusstechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Dr. rer. nat. Karl-Heinz Daehre, Minister a.D.

1 Einleitung

1.1 Ausgangsbetrachtungen

Mobilität stellt für die heutige Gesellschaft nicht nur ein Grundbedürfnis, sondern auch einen erheblichen Wettbewerbs- und Wachstumsfaktor für alle Volkswirtschaften dar. Deutschland setzt sich in diversen Umfragen und Studien wiederholt als Logistikweltmeister durch. Die gute Straßen- und Schienenvernetzung der Bundesrepublik mit den europäischen Nachbarstaaten sowie modale Verteilung der Personen- und Güterverkehre auf die verschiedenen Verkehrsträger bietet eine solide Voraussetzung für ein leistungsfähiges und flexibles Transportnetz im europäischen Kontext. Ebenfalls ist eine Anbindung an die Weltmeere durch leistungsfähige und vorwiegend gut ausgebaute Häfen zur globalen Vernetzung durch die Wasserstraßen gesichert. Im Gesamtkontext ist Deutschland laut aktueller Studie des Instituts der deutschen Wirtschaft Köln überdurchschnittlich gut in Bereich Infrastruktur aufgestellt [1].

Durch die zunehmende Globalisierung wachsen auch die Anforderungen an die Verkehrsinfrastruktur der einzelnen Verkehrsträger. Mit Zunahme der Anzahl der EU-Mitgliedstaaten nehmen die grenzüberschreitenden Verkehre zu und damit auch die Belastung der physischen Verkehrsinfrastruktur. Als „neue Mitte Europas“ wird Deutschland sich einem erheblichen Exportwachstum und einer Zunahme des Güter- und Personenverkehrs stellen müssen. Die dafür notwendige Infrastruktur ist vor allem in Deutschland aufgrund seiner geographischen Lage von höchstem wirtschaftlichem und politischem Interesse. Die derzeit kaum beachtete gesellschaftliche Debatte über die kritische Finanzierungssituation gefährdet die Leistungsfähigkeit der Infrastruktur und damit auch das Wirtschaftswachstum und den Wohlstand Deutschlands.

1.2 Verkehrs- und Baulastträger

Die Gesamtheit aller Verkehrsmittel, die die gleiche Art von Verkehrsinfrastruktur benutzen, werden Verkehrsträger genannt. Unterschieden wird in der Regel zwischen den Verkehrsträgern Straße, Schiene, Wasserstraße (Schifffahrt) sowie Luft- und Raumfahrt. Vermehrt wird auch der Nachrichtenverkehr als eigener Verkehrsträger betrachtet (siehe Abbildung 1).

Abbildung 1: Einteilung der Verkehrsträger [2]

Der inhaltliche Fokus des Beitrags liegt auf den Verkehrsträgern Straße, Schiene und Wasserstraße, da in diesen Bereichen das hauptsächliche Problemfeld und die größte Handlungsnotwendigkeit gesehen werden.
In Deutschland unterliegen der Neu- und Ausbau sowie die Unterhaltung der Infrastrukturen der einzelnen Verkehrsträger den drei Gebietskörperschaften Bund, Ländern und Kommunen [3]. Für den Bereich Straße unterliegen bspw. die Bundesautobahnen und Bundesfernstraßen dem Bund, Landes- und Staatsstraßen hingegen den einzelnen Bundesländern. Für den weiteren Verlauf des Beitrags kann folgende horizontale und vertikale Aufteilung der Verkehre – dargestellt in Abbildung 2 – als grundlegend angesehen werden.

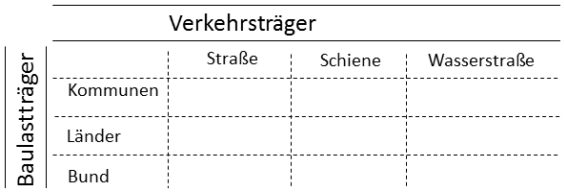


Abbildung 2: Horizontale und vertikale Einteilung in Verkehrs- und Baulastträger [2], [3]

1.3 Entwicklungsprognosen

Zur Gewährleistung einer flexiblen und leistungsfähigen Verkehrsinfrastruktur bedarf es neben der Betrachtung des heutigen Verkehrsaufkommens ebenfalls der Berücksichtigung der prognostizierten Zunahme des Personen- und Güterverkehrs (siehe Abbildung 3).

Abbildung 3: Entwicklung des Personen- und Güterverkehrs bis 2020 [4]

So stellt u.a. eine Studie des Konvents für Technikwissenschaften (acatech) bis zum Jahr 2020 Wachstumsraten von 20% beim Pkw-Verkehr sowie 22,5% beim Schienenpersonenverkehr in Aussicht. Im Bereich des Güterverkehrs wird sogar mit einer Zunahme von 34% auf der Straße und 55% auf der Schiene gerechnet [4].

Darüber hinaus sind neben den Wachstumsraten der Personen- und Güterverkehre strukturelle Veränderungen hinsichtlich des demographischen Wandels zu berücksichtigen. Ein Rückgang der Geburtenrate und eine regional differenzierte Verlagerung des Lebensmittelpunkts aus vornehmlich den ländlichen Regionen hin zu den städtischen Ballungsräumen werden sich in Zukunft stark auf die (Verkehrs)-Infrastruktur auswirken.

2 Motivation

2.1 Problemstellung

Mit Rückblick auf die Entwicklung der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland sind in den letzten Jahrzehnten hinreichende Finanzmittel in den Aus- und Neubau investiert wurden. Die Vorteile sind dabei klar ersichtlich. Deutschland als eine führende Industrienation kann auf ein gut ausgebautes Verkehrsnetz blicken, das sehr leistungsfähig und flexibel auf verschiedene Verkehrsströme reagieren kann.

Unter dem Gesichtspunkt der Erhaltung ist dies aber als problematisch anzusehen. Zunehmend verschlechtert sich die Beschaffenheit der Straßen-, Schienen- und Wasserwegeinfrastruktur. Viele in den 60er Jahren entstandene Brücken sind bspw. mittlerweile mehr als sanierungsbedürftig und müssen zum Teil zukünftig gesperrt werden. Straßen sind besonders auf Landes- und Kommunalebene zunehmend mit gravierenden Abnutzungsspuren versehen. Schienen- und Wasserwege sind ebenfalls durch die Bereitstellung unzureichender finanzieller Mittel in deren Funktionalität beeinträchtigt. Wartenberg und Haß verdeutlichen dies mit ihrer Aussage „Deutschland lebt heute von seiner Substanz“ [5].

Durch dauerhaft fehlende Finanzmittel für die Verkehrsinfrastruktur und der daraus resultierenden permanenten Unterfinanzierung der Verkehrsträger wird in den kommenden Jahren der Substanzverzehr der Infrastruktur überproportional ansteigen. Dies hat zur Folge, dass durch immer knapper werdende finanzielle Mittel für die Verkehrsinfrastruktur und besonders vor dem Hintergrund der seit 2009 verankerten Schuldenbremse im Grundgesetzbuch, mit einer Entspannung der schleichenden Situation des Substanzverzehrs vorerst nicht zu rechnen ist [6]. Darüber hinaus wird zukünftig die Verkehrsinfrastruktur durch das veränderte Mobilitätsbewusstsein der Bevölkerung und die weiter zunehmende Globalisierung einen immer höheren Stellenwert einnehmen.

2.2 Bund-Länder-Kommission

Die Verkehrsminister der Länder und des Bundes haben bereits ein durchgängiges Problembewusstsein hinsichtlich der Unterfinanzierung der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland entwickelt und in Folge dessen im Jahr 2011 eine Bund-Länder-Kommission gegründet, welche die „Zukunft der Verkehrsinfrastrukturfinanzierung“ untersuchen und Vorschläge zur mittel- bis langfristigen Behebung der oben genannten Probleme ausarbeiten soll. Neben der politischen Zusammensetzung durch verschiedenen Landesverkehrsminister und Vertreter des Bundes ist die Kommission ebenfalls auf der Arbeitsgruppenebene mit Fachexperten aus Wissenschaft und Forschung besetzt [7].

2.3 Aufgaben- und Zielstellung

Die Kommission beschäftigt sich neben der Frage nach dem Ausgleich des Defizits an Mitteln für die Infrastrukturen der Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße mit der Untersuchung und Prüfung von gegenwärtigen und zukunftsträchtigen Finanzierungsmodellen zur Sicherung der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland.

Weiterhin ist es Aufgabe der Kommission, die Finanzierungsinstrumente unter verschiedenen Aspekten – Abschätzungen nach verkehrlichen, ökonomischen, ökologischen und sozialen Gesichtspunkten – zu bewerten, mit dem Ziel eine ergebnisoffene Gegenüberstellung zu erarbeiten und Empfehlungen für die Politik abzuleiten.

Die Vorgehensweise ist dabei klar in eine erste Phase der Ist-Analyse strukturiert, in der Gutachten vergeben, Datenerhebungen veranlasst, Berater herangezogen sowie Expertengespräche und Anhörungen durchgeführt werden. Parallel werden hierzu verkehrsträgerbezogene Arbeitsgruppen gebildet, die Finanzierungsinstrumente und ganzheitliche Finanzierungskonzepte erarbeiten und auf eine festgelegte Anzahl an Bewertungskriterien hin untersuchen. Im letzten Schritt wird die Anfertigung eines Abschlussberichts erfolgen, der die gewonnenen Erkenntnisse zusammenfasst und als Grundlage für eine gesellschaftliche und politische Diskussion dienen soll.

3 Europäischer Vergleich

3.1 Bestandsnetz in Deutschland

Wie bereits einleitend erwähnt ist die Verkehrsinfrastruktur in Deutschland weitestgehend ausgebaut. Nach einer Analyse verschiedener Gutachten sind in Deutschland knapp 730 Tkm an Bestandsnetz der Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße vorzufinden [8].

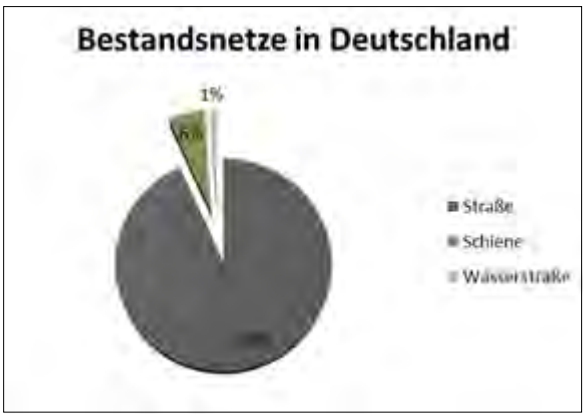


Abbildung 4. Prozentuale Verteilung der Verkehrsträger auf das Bestandsnetz in Deutschland [8]

Wie in Abbildung 4 zu sehen, umfasst der Bereich Straße einen Anteil von knapp 93% des gesamten Bestandsnetzes in Deutschland. Bereiche bilden hier neben dem größten Block der kommunalen und Kreisstraßen (ca. 540 Tkm) auf Landeseben die Staats- und Landesstraßen (ca. 86 Tkm) sowie auf Bundesebene die Bundesautobahnen und Bundesfernstraßen (ca. 52 Tkm).

Die Schieneninfrastruktur in Deutschland besteht aus ca. 33 Tkm Schienennetz (DB Netz), knapp 2,8 Tkm Schienennetz der nichtbundeseigenen Eisenbahnen (NE-Bahnen) sowie sonstiger Schieneninfrastrukturen (etwa U-Bahnen, S-Bahnen oder Straßenbahnen).

Den längenmäßig geringsten Anteil der Verkehrsinfrastruktur bilden die Bundes- (7,35 Tkm) und Landeswasserstraßen (0,3 Tkm) [8].

3.2 Einnahmequellen in Deutschland

Die derzeitige Finanzierung der Verkehrsinfrastruktur und damit auch des Bestandsnetzes erfolgt größtenteils aus allgemeinen Steuern und Abgaben.

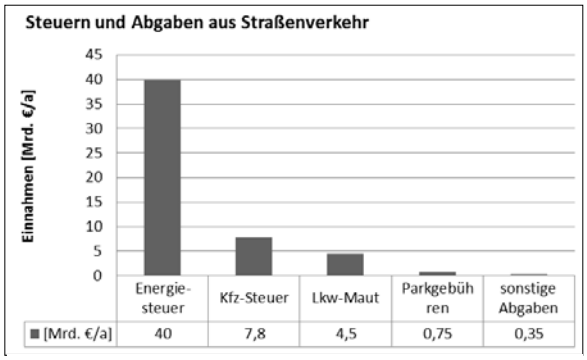


Abbildung 5: Steuern und Abgaben aus dem Straßenverkehr [9]

Wie in Abbildung 5 zusammengestellt, werden in Deutschland schwerpunktmäßig ca. 40 Mrd. €/a an Finanzmitteln aus der Energiesteuer eingenommen. Neben weiteren Einnahmen aus der Kfz-Steuer (ca. 7,8 Mrd. €/a) werden zusätzliche Abgaben über die seit 2005 eingeführte Lkw-Maut – gültig auf Bundesautobahnen für Lkw > 12t zGG sowie seit August 2012 zusätzlich auf Teilen des Bundesstraßennetzes – in Höhe von ca. 4,5 Mrd. €/a eingenommen. Unter Berücksichtigung von Parkgebühren und sonstigen Abgaben ergeben sich damit Einnahmen in Höhe von über 53 Mrd. €/a [9].

Im Gegensatz dazu werden im Bereich Schiene und Wasserstraße weitaus weniger Einnahmen generiert. Wie in Abbildung 6 ersichtlich sind Steuern und Abgaben in Höhe von ca. 5,7 Mrd. €/a zu verzeichnen. Weitere nicht dargestellte Einnahmequellen sind Liegegebühren aus den Binnen- und Seeschifffahrt [9].

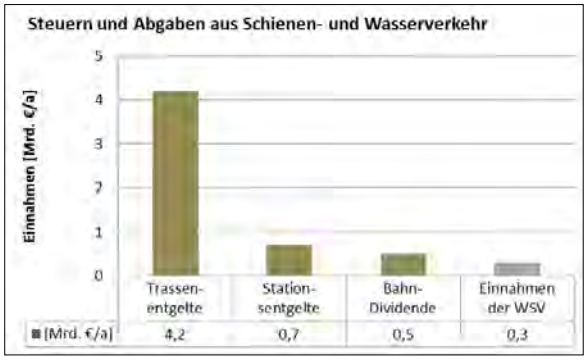


Abbildung 6: Steuern und Abgaben aus dem Schienen- und Wasserverkehr [9]

Werden die Einnahmen aus allen drei Verkehrsträgern zusammengetragen (ohne Berücksichtigung von Transaktionskosten) steht eine jährliche Einnahmesumme über 58 Mrd. € aus Steuern und Abgaben zur Verfügung.

3.3 Bedarf und Defizit in Deutschland

In Deutschland unterliegen viele Einnahmequellen dem Nonaffektationsprinzip. Dieses besagt, dass keine direkte Gegenleistung bei der Mittelerhebung zugeordnet werden muss und somit auch keine Zweckbindung der Mittel für den erhobenen Bereich besteht. Dies hat am Beispiel der Energiesteuer zur Folge, dass nach Schätzungen nur ca. 4,5 bis 5 Mrd. €/a für den Bereich Verkehr eingesetzt werden. Dies entspricht einem Anteil von nur 10% der Gesamteinnahmen aus der Energiesteuer. Die restlichen 90 % der Energiesteuereinnahmen werden hauptsächlich für nicht verkehrliche oder nur im entferntesten dem Verkehr zugehörigen Zwecke verwendet [9].

Der Mittelbedarf allein für den Erhalt und Betrieb der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland beläuft sich nach Angaben der Kommission auf über 17 Mrd. €/a. ungeachtet der Mittel des Nachholbedarfs von rückgestauten Investitionen [8].

Wie bereits beschrieben ist die Verkehrsinfrastruktur stark unterfinanziert. Da in den letzten Jahren und Jahrzehnten nicht genügend Mittel für den Verkehrssektor bereitgestellt wurde, steigt der Nachholbedarf an Investitionen immer weiter an.

Gegenüber dem tatsächlichen Finanzbedarf für die Infrastruktur verbleibt auf Basis des Jahres 2012 über alle genannten Verkehrsträger in Baulastträgerschaft des Bundes, der Länder und der Kommunen eine Deckungslücke für Erhalt, Betrieb und Nachholbedarf von 7 Mrd. €. Dieses jährliche Defizit führt dazu, dass die Qualität der Verkehrsinfrastruktur weiter sinken und zu Einschränkungen in der Befahrbarkeit führen wird [10].

3.4 Europa-Benchmark

Neben der Fragestellung nach der Finanzierungssituation in Deutschland sind im europäischen Vergleich weitere Finanzierungsmodelle zu finden.

Im Bereich der Einnahmen aus dem Straßensektor werden in den meisten europäischen Ländern die Haupteinnahmen aus Treibstoffen (Mineral- oder Energiesteuern) erwirtschaftet. Kfz-bezogene Steuern sind in den meisten Fällen als allgemeine Steuern ausgestaltet, bei denen, wie bereits eingangs bei der Energiesteuer erläutert, keine direkte Zweckbindung herrscht. Deutschland befindet sich bei den Steuereinnahmen im vorderen Mittelfeld (vgl. Abbildung 7).

.

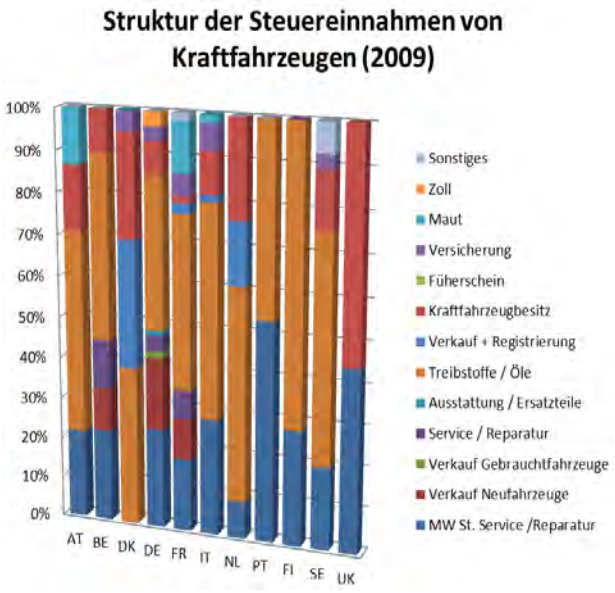


Abbildung 6: Struktur der Steuereinnahmen von motorisierten. Straßenfahrzeugen 2009 [11]

Neben den allgemeinen Abgaben aus Steuern werden in zahlreichen EU-Ländern nutzerabhängige Abgaben geleistet, u. a. durch zeit- oder entfernungsabhängige Nutzung der Verkehrsinfrastruktur. Derzeit verfügen in der EU 22 der 27 Staaten über Nutzerfinanzierungsmodelle für Lkw in unterschiedlicher Form (u.a. Vignette, Maut, Konzessionsabgaben). Darüber hinaus sind bei 12 der 27 Staaten Nutzerfinanzierungsmodelle für Pkw im Einsatz [12].

In Deutschland wird seit 2005 eine Maut für alle fahrenden Lkw auf dem Bundesnetz erhoben. Andere in Europa anzufindenden Finanzierungsmodelle, wie bspw. die Pkw-Maut, Nahverkehrsabgabe oder City-Maut kommen in Deutschland bislang nicht zum Einsatz [11].

Im Allgemeinen erzielen die Schienenunternehmen nur in den seltensten Fällen Gewinne. Die Betreiber erhalten daher aus verkehrspolitischen Gründen staatliche Unterstützungen, die aus den anderen Verkehrsträgern quersubventioniert werden, um die Bereitstellung und den Betrieb der Schieneninfrastruktur zu gewährleisten. Die Einnahmen von Nutzern der Eisenbahnen werden in der Regel innerhalb des Bahnsektors weiterverwendet [11].

Bei dem Verkehrsträger Wasserstraße ergibt sich ein ähnliches Bild. Wie bei der Schiene können Einnahmen bspw. aus Wasserstraßen- und Schifffahrtsverordnungen (WSV) die Ausgaben des Verkehrsträgers nicht decken. Die Finanzierung der Binnenwasserwege in Europa wird daher überwiegend aus staatlichen Haushaltsmitteln finanziert. Eine Erhöhung der Gebühreneinnahmen durch Abgaben auf den Binnengewässern des Rheins und der Donau sind durch die Festlegung der Mannheimer Akte von 1868 sowie der Belgrader Konvention von 1948 nicht möglich [11].

Im europäischen Vergleich sind allgemeine Steuern in Form von Energie- bzw. Mineralölabgaben als primäre Finanzierungsquelle aus dem motorisierten Verkehr anzufinden. In Erweiterung dessen nimmt die EU-Politik seit den 1990er Jahren eine Umstellung der Einnahmequellen auf die Nutzerfinanzierung der Verkehrsinfrastrukturen auf allen Ebenen der Baulastträger vor [12].

4 Zwischenergebnisse

4.1 Instrumentenkasten

Auf Grundlage der Ergebnisse des europäischen Benchmarks und weiterer Überlegungen kommen u. a. für den Wirtschaftsstandort Deutschland folgende Finanzierungsinstrumente bzw. die Ausweitung aktuell vorhandener Instrumente zur Erweiterung der Finanzierungsbasis in Frage. Diese Auswahl ist in Abbildung 8 dargestellt.

(I) Erhöhung der Haushaltsansätze
(II) Erhöhung/ Ausweitung der Lkw-Maut
(III) Infrastrukturabgabe für Pkw
(IV) Nahverkehrsabgabe
(V) City-Maut
(VI) Erhöhung/ Ausweitung Entgelte für Wasserwege
(VII) Effizienzmaßnahmen auf der Ausgabeseite

Abbildung 7: Mögliche Finanzierungsinstrumente aus dem europäischen Umfeld [13]

Die Ausgangslage zur Erhöhung der Finanzierungsbasis sollte zunächst die Untersuchung der Möglichkeiten u.a. von Einsparpotenzialen auf der Ausgabeseite (VII) sein, z.B. durch effizienzsteigernde Maßnahmen wie der Optimierung der Beschaffungsvorgänge (Zeitpunkt und Losgröße) oder der Finanzierung (u.a. Planungskostenpauschalen).
Alle Instrumente beschreiben Möglichkeiten, zusätzliche Finanzmittel für den Verkehr zu generieren. Über allem sollte zunächst die Instrumentensäule (I) stehen und durch Zweckbindung und Erhöhung von Haushaltsmitteln für den Verkehrsbereich (z. B. durch Realisierung der Zweckbindung, wie 1964 im Straßenbaufinanzierungsgesetz verankert [14]) die Unterfinanzierungssituation entschärfen. Die weiteren Instrumente (II) und (III) beschreiben Maßnahmen zur Erhöhung (Aktualisierung der Mautsätze) sowie Ausweitung (Fahrzeugklassen, Gesamtgewicht, Straßennetze) des bestehenden Maut-Systems in Deutschland. Die Instrumentensäulen (IV) und (V) sind Erhebungskonzepte aus dem europäischen Umfeld und wirken vorrangig im kommunalen Bereich. Die letzte hier gezeigte Instrumentensäule beschäftigt sich mit der Erhöhung der Entgelte (z. B. über die Wasserstraßenverordnung) oder durch Ausweitung der Nutzerfinanzierung (z. B. auf Donau und Rhein) [13].

4.2 Weiterer Arbeitsschritte

Ziel der Kommission ist es, die defizitäre Finanzierungssituation in Deutschland durch konkrete Verbesserungsvorschläge zu optimieren. Daher ist es notwendig, wie bereits im Abschnitt 4.1 beschrieben, Finanzierungsinstrumente auf allen Ebenen der Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße zu eruieren, zu bewerten und deren Vor- und Nachteile herauszustellen.

Im weiteren Arbeitsprozess der Kommission werden alle ermittelten Instrumente nach festgelegten Kriterien bewertet. Hierbei wird u. a. das Aufkommen (Höhe der Einnahmen), der Ort der Erhebung, der Begünstigte (Verkehrsträger, Baulastträger), der Verteilmechanismus, die Lenkungswirkung, sowie technische und rechtliche Umsetzbarkeit der einzelnen Instrumente bewertet. Weitere Aspekte wie die ökonomische und soziale Wirkung sowie Datenschutz und Systemsicherheit müssen ebenfalls berücksichtigt werden.

In einem Abschlussbericht der Kommission werden alle Möglichkeiten der Sicherstellung der zukünftigen Verkehrsinfrastrukturfinanzierung sowie die Bewertung und deren Vor- und Nachteile ergebnisoffen dargestellt. Der Bericht soll darüber hinaus impulsgebend für eine notwendige politische und gesamtgesellschaftliche Debatte in Deutschland werden [15].

5 Forschungsvorhaben

5.1 Bisheriger Wissenstand

„Mehr Verkehr – weniger Geld? – Wer bezahlt für die Verkehrswege von morgen?“ [16]. Diese und viele damit verbundenen Fragen werden bisher in ausgiebigen Gutachten [17] und wissenschaftlichen Arbeiten im Bereich des Verkehrswesens betrachtet und versucht zu klären [18], [19]. Es werden in der Literatur u. a. verschiedene zukunftsträchtige Verkehrs- und Mobilitätskonzepte begutachtet sowie Möglichkeiten zur künftigen Finanzierung der Verkehrswege in Deutschland eruiert. Eine weitere in diesem Zusammenhang noch nicht ausreichend beantwortete Frage beschäftigt sich damit, wo aus gesamt verkehrlicher Sicht in Zukunft welche Arten von Verkehrsinfrastruktur benötigt werden und wie dies ohne spezifische Gutachten herausgearbeitet werden kann.

5.2 Abgeleitetes Forschungsvorhaben

Herausgelöst aus dem Kommissionsauftrag und dem bisherigen Wissensstand lassen sich mehrere Fragestellungen für ein Forschungsvorhaben daraus ableiten. Im Gegensatz zur Zielstellung der Kommission, Finanzierungsfragen zur mittelgerechten Ausstattung der einzelnen Verkehrs- und Baulastträger für die Zukunft der Verkehrsinfrastruktur zu beantworten, besteht darüber hinaus die Forderung danach, zu klären, welcher Gestaltungsbedarf an Verkehrsinfrastruktur auf die jeweilige regionaldifferenzierte Verkehrsinfrastruktur benötigt wird und welche Handlungsempfehlungen zu einem optimalen Verkehrsinfrastruktur für den Personen- und Güterverkehr daraus abgeleitet werden können. Neben dieser Fragestellung muss sich ebenfalls mit der Zukunftsentwicklung des Wirtschaftsstandorts Deutschland befasst werden und grundlegende Einflussfaktoren, wie z. B. demografische Trendfaktoren oder Wirkungsweisen von Finanzierungsformen in die Forschungsarbeit einfließen.

Das Forschungsvorhaben soll daher die erarbeiteten Ergebnisse der Kommission „Zukunft der Verkehrsinfrastruktur“ nutzen und diese zu einer Vorgehensweise (vgl. Abbildung 9), welche ein allgemeingültiges Konzept zur

Analyse [20] und Gestaltung von Verkehrs- und Transportnetzen auf Basis von regionsspezifischen Einflussfaktoren bereithält, weiterentwickeln. Eine Rückkopplung zu den Finanzierungsinstrumenten soll dabei im Ergebnis mitbetrachtet werden. Folgende Abbildung 9 zeigt die abstrahierte Abgrenzung des Forschungsvorhabens zum Aufgabenfeld der Kommission.

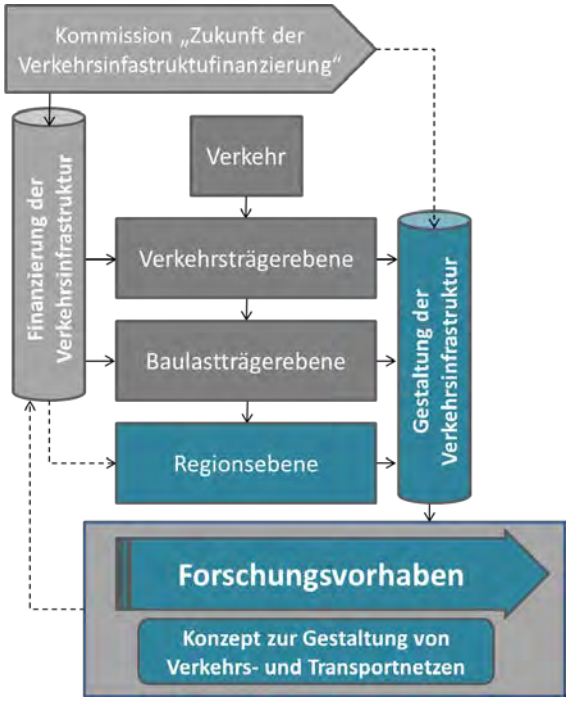


Abbildung 8: Abgeleitete Vorgehensweise des Forschungsvorhabens

Ziel des Forschungsvorhabens soll es sein, aus dem erarbeiteten Konzept zur Gestaltung von Verkehrs- und Transportnetzwerken gezielte, regionsspezifische Handlungsempfehlungen abzuleiten. Hierzu ist ein wesentlicher Schritt die Entwicklung eines Merkmalskatalogs (Morphologie) für die Spezifikation von unterschiedlich typisierten Regionen in Bezug auf die Einflussfaktoren der Verkehrsinfrastruktur (vgl. Tabelle 1).

Merkmal	Merkmalsausprägung			
Bevölkerungsdichte	Städtisch	Intermediär	Ländlich	
Verkehrsträger	Straße	Schiene	Wasser	
Baulastträger	Bund	Länder	Kommunen	
Bevölkerungswachstum	Steigend	Stagnierend	Sinkend	
Wirtschaftswachstum	Steigend	Stagnierend	Sinkend	
Verkehrsart	Durchgangsverkehr	Zielverkehr	Quellverkehr	Binnenverkehr
Verkehrsträgerdichte	Hoch	Mittel	Gering	
Verkehrsmitteldichte	Hoch	Mittel	Gering	
Intermodalität	Hoch	Mittel	Gering	
Personenkilometer	Hoch	Mittel	Gering	
Tonnenkilometer	Hoch	Mittel	Gering	
Flexibilität	Flexibel	Statisch		
Reisegeschwindigkeit	Schnell	Langsam		

Tabelle 1: Morphologie zur Entwicklung von Szenario-Regionen und Einordnung von realen Regionen

Aus der in Tabelle 1 erarbeiteten Morphologie können unterschiedliche Szenario-Regionen in Abhängigkeit von der Merkmalsausprägung entwickelt werden und real existierenden Regionen zugeordnet werden (Klassenbildung), mit dem Ziel, geeignete Handlungsbündel für die untersuchte Region vorzuschlagen.

Neben der Analyse und Kategorisierung [21] von einzelnen Verkehrsregionen ist die zukünftige Entwicklung einer Region von besonderer Bedeutung. Einflussfaktoren wie bspw. Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum oder auch -verlagerung sind wichtige Entscheidungsparameter für die richtige Empfehlung von Handlungsmöglichkeiten. Hierzu wird der an Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und dem Fraunhofer-Institut IFF entwickelte mesoskopische Ansatz [22] genutzt, um Zukunftsszenarien in Abhängigkeit von den regionsspezifischen Ausgangsparametern und Einflussfaktoren zu simulieren.

Das Ergebnis des Forschungsvorhabens soll ein Konzept zur Gestaltung der Verkehrs- und Transportnetze unter Anwendung von Problemlösungszyklen beinhalten [23], das es ermöglicht, konkrete Anwendungsfälle (reale Regionen) mit Hilfe der Morphologie zu Kategorisierungen unter Zuhilfenahme des mesoskopischen Ansatzes Handlungsempfehlungen für die Gestaltungsanforderungen der betrachteten Verkehrs- und Transportnetze im Ist-Stand sowie in Zukunftsszenarien auszusprechen.

6 Literatur

[1] Institut der deutschen Wirtschaft Köln: Die Messung der industriellen Standortqualität in Deutschland. Endbericht, Köln, 2012, S. 236.

[2] S. Kummer: Einführung in die Verkehrswirtschaft. UTB, Facultas Verlags-und Buchhandels AG, WUV, Wien, 2.Auflage, 2010, S.41.

[3] Logistikbranche: Stichwort Verkehrsträger. In: URL: www.logistikbranche.net/verkehrstraege.html, Stand: 22.10.2012.

[4] Lemmer et al.: Handlungsfeld Mobilität – Infrastrukturen sichern Verkehrseffizienz verbessern Exportchancen ergreifen. Acatech Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2011, S.1.

[5] Wartenberg, L., Haß, L.-J.: Investition in die Zukunft. WILEY-VCH Verlag & GmbH & Co. KG, Weinheim, 1. Auflage, 2005, s.154.

[6] Merati-Kashani, J.: Aktueller Begriff: Die Schuldenbremse des Grundgesetzes, Deutscher Bundestag. 2009, In: URL: http://www. bundestag.de/dokumente/analysen/2009/schuldenbremse.pdf, Stand: 22.10.2012.

[7] VMK: Einsetzungsbeschluss der Verkehrsministerkonferenz: Kommission "Zukunft der Verkehrsinfrastrukturfinanzierung". 2011, In: URL: http://www.bundesrat.de/cln_320/nn_8794/DE/gremienkonf/fachministerkonf/vmk/Sitzungen/11-12-02-kommissionzukunftvif.html?__nnn=true,Stand: 22.10.2012.

[8] Schmid, F. M.: Bestandsnetz in Deutschland. unveröff. Manuskript, Willich, 2012.

[9] Schmid, F. M.: Einnahmequellen aus Verkehr in Deutschland. unveröff. Manuskript, Willich, 2012.

[10] Kommission "Zukunft der Verkehrsinfrastruktur" et al.: 2. Zwischenbericht. Cottbus, unveröff. Manuskript, 2012.

[11] European Union Road Federation: ERF 2011 European Road Statistics. Brussels, 2011, In: URL: http://www.erf.be/images/stories/Statistics/2011/ERF-2011-STATS.pdf, Stand: 24.10.2012, S. 65.

[12] European Commission: Communication from the Commission on the application of national road infrastructure charges levied on light private vehicles. Brüssel, 2012, In: URL: http://ec.europa.eu/-transport/road/doc/com-2012-199.pdf, Stand:22.10.2012.

[13] Kommission "Zukunft der Verkehrsinfrastruktur" et al.: Instrumentenkasten. Magdeburg, unveröff. Manuskript, 2012.

[14] Straßenbaufinanzierungsgesetz. 1960, In: URL: http://www.buzer.de/gesetz/6951/index.htm, Stand: 22.10.2012.

[15] Daehre, K.-H.; Trojahn, S.; Behrendt, F.: Zustandsbericht zur bedarfsgerechten Zukunft der Verkehrsinfrastrukturfinanzierung, Präsentation, Bauindustrieverband Berlin-Brandenburg e.V., Potsdam, 25.10.2012.

[16] IHK NRW: Forderung an Politik beim IHK-NRW-Verkehrskongress: Investition in Infrastruktur punktgenau statt flächendeckend – Kollaps auf Straßen und Schienen sonst unvermeidbar. Düssseldorf, 2o12, In: URL: http://www.ihk-.de/sites/default/files/news_files/pm_verkehrskon-gress_2012_03_12.pdf, Stand: 22.10.2012.

[17] Wissenschaftlicher Beirat für Verkehr: Strategieplanung Mobilität und Transport – Forderungen für die Bundesverkehrswegeplanung. Berlin, 2009.

[18] Knieps, G.: Verkehrsinfrastruktur. Diskussionsbeitrag, Institut für Verkehrswissenschaft und Regionalpolitik, 2003.

[19] Ahrend, C.: Analyse Nutzenverhalten und Raumplanung regionaler Infrastruktur. Ergebnisbericht, Technische Universität Berlin, 2011.

[20] Schenk, M.: Skript zur Vorlesung Logistikprozessanalyse. Institut für Logistik- und Materialflusstechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2008, V1 S.12.

[21] Trojahn, S.: Vorgehensweise zur Struktur- und Standortentscheidung dezentraler Anlagen. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2010, S.96.

[22] Reggelin, T.: Mesoskopische Modellierung und Simulation logistischer Flusssysteme. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2011, S. 33-43.

[23] Illes, B.; Glistau, E.; Coello, N. I.: Logistik und Qualitätsmanagement, 1. Auflage, Mikolc, 2007, S.172-177.

KOMPAKTER, MULTIFUNKTIONALER SENSOR AUF BASIS VON TIEFENBILDTECHNOLOGIE FÜR DIE SCHÜTTGUTTECHNIK

Dipl.-Ing. Liu Cao
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF,
Materialflusstechnik und -systeme

Dipl.-Ing. Hagen Borstell,
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF,
Materialflusstechnik und -systeme

Jewgeni Kluth
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF,
Materialflusstechnik und -systeme

Prof. Dr.-Ing. Klaus Richter
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF,
Materialflusstechnik und -systeme

KOMPAKTER, MULTIFUNKTIONALER SENSOR AUF BASIS VON TIEFENBILDTECHNOLOGIE FÜR DIE SCHÜTTGUTTECHNIK

Dipl.-Ing. Liu Cao, Dipl.-Ing. Hagen Borstell, Jewgeni Kluth; Prof. Dr.-Ing. Klaus Richter
Materialflusstechnik und -systeme, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF

1 Abstrakt

Es wird ein kompakter, multifunktionaler Sensor vorgestellt, mit dem relevante Parameter der Fördergurtüberwachung erfasst werden können. Die einzelnen Parameter, wie die Überwachung des Gurtschieflaufs, die Erfassung des Gutquerschnitts und die Schüttvolumenbestimmung auf dem Förderband, können parallel und in Echtzeit ermittelt werden. Der entwickelte Sensor basiert auf der Tiefenbildtechnologie der Firma PrimeSense, welche eine flächige Rekonstruktion von 3D-Daten ermöglicht. Es wurde eine 3D-Analysemodul entwickelt, mit welchem aus den rekonstruierten 3D-Daten die oben genannten Parameter in Echtzeit (ca. 10Hz) berechnet werden können.

2 Einleitung

Die Zustandserfassung innerhalb der Gurtfördertechnik stellt eine Herausforderung in der Fördergurtbranche dar. Zur Erfassung der einzelnen Parameter (z.B. Gurtschieflauf, Bandgeschwindigkeit, Querschnitt des Förderguts u.a.) werden heutzutage komplexe und heterogene (bzgl. der Messprinzipien, der Schnittstellen) Sensorsysteme verwendet. In Tabelle 1 ist ein Überblick von - in der Praxis verwendeten - Sensorkomponenten und deren Messprinzipien zur Überwachung von Fördergurten angegeben.

Funktionen	Sensoren	Messprinzip
Gurtschieflauf	Bandschief-laufsensoren Kippschalter	mechanisch magnetisch akustisch optisch
Gurtdehnung	Kraftmesser Magnetstreifen	mechanisch magnetisch
Gurtoberflächen	Magnetinduktionsscanner	optisch magnetisch
Gurt-geschwindigkeit	Laufrad Magnet-impulsgeber	mechanisch magnetisch
Gutvolumen Gutquerschnitt	Radar Laserscanner	elektro-magnetisch optisch

Tabelle 1: Überwachungssensorik in der Schüttguttechnik

Die Integration zu einem ganzheitliches Überwachungssystem auf Grundlage der in Tabelle 1 angegebenen Sensoren ist stets mit Komplexität, einem hohen Aufwand in der Systemintegration - und Systemwartung verbunden und stellt somit einen wesentlichen Kostenfaktor dar.

Ausgehend von dieser Problematik hat das Kompetenzfeld Materialflusstechnik und -systeme des Fraunhofer Instituts Magdeburg IFF einen kompakten, multifunktionalen Sensor konzipiert und innerhalb einer ersten Phase prototypisch entwickelt. Der kompakte Sensor basiert auf der Tiefenbildtechnologie der Firma PrimeSense, welche bereits erfolgreich in anderen Projekten verwendet wurde, bspw. zur Überwachung des Ladezustandes von Transportmitteln [1]. Der Wirtschaftlichkeit des Sensors als Alternative zu klassischen Überwachungssystemen ergibt sich im Wesentlichen aus der Anzahl der erfassbaren, relevanten Parameter. So war es Ziel der Entwicklung, die Erfassung möglichst vieler relevanter Parameter durch den Sensor abzudecken und den Einsatz zusätzlicher Sensoren überflüssig zu machen (vgl. Tabelle 2).

Wir sind der Meinung, dass die Verwendung des vorgestellten Messsystems auf Basis von Tiefenbildtechnologie neben kurzfristigen ökonomischen Vorteilen auch langfristige instandhaltungsrelevante Vorteile für die Fördertechnik bietet. Ähnliche multifunktionale Systeme sind zurzeit auf dem Markt nicht vorhanden.

3 Entwicklungskonzept

Für die Auswertung des Fördergurtzustands ist eine schnelle Erfassung von 3D-Daten notwendig. Dieses begründet sich mit der kontinuierlichen Überwachung des Gurtes und des Gutes und der daraus folgenden Reaktionszeiten für das Überwachungssystem. Ausgehend von eigenen Entwicklungsergebnissen zur Überwachung des Ladezustandes von Transportmitteln [1] und publizierten Forschungsergebnissen des RobLog-Projektes der Universität Örebro [2] sowie von Chow et al. [3] wurde die PrimeSense-Tiefenbild-Technologie als Basistechnologie für den kompakten, multifunktionalen Tiefenbildsensor ausgewählt. Alle Studien heben die sehr guten Eigenschaften der Technologie in den Kategorien Genauigkeit, Aufnahmefrequenz, Sichtfeld, Lesereichweite und Wirtschaftlichkeit gegenüber alternativen Technologien (TOF, Stereo Vision, Laser) hervor.

Die Tiefenwertbestimmung erfolgt in einer Frequenz von 30 Hz und liefert pro Aufnahme ein sehr dichtes Tiefenbild in einer Auflösung von bis zu 640 x 480 Pixel.

Auf Basis der Tiefenwerte soll das Sensorsystem konzeptionell eine möglichst große Anzahl an Parametern für die Gurtüberwachung bei Schüttgutanwendungen bestimmen. In Zusammenarbeit mit Partnern aus der Schüttgutbranche wurden im Rahmen einer Anforderungsanalyse relevante Funktionen identifiziert und für die Umsetzung innerhalb des kompakten Sensors ausgewählt (vgl. Tabelle 2).

Parameter	Beschreibung
Gurtschieflauf	Positionsabweichung der Gurtkante gegenüber Normposition der Gurtkante in cm
Gutquerschnitt	Querschnittsfläche des Gutes senkrecht zur Förderrichtung in cm²
Gutschüttwinkel	Neigungswinkel des Schüttgutes in °
Gurtgeschwindigkeit	Geschwindigkeit des Fördergutes in m/s
Gutanomalien	Warnung [0 / 1]

Tabelle 2: Funktionsübersicht

Die Software-Entwicklung erfolgte auf Grundlage eines modularen Hard- und Softwarekonzeptes (vgl. Abbildung 1).

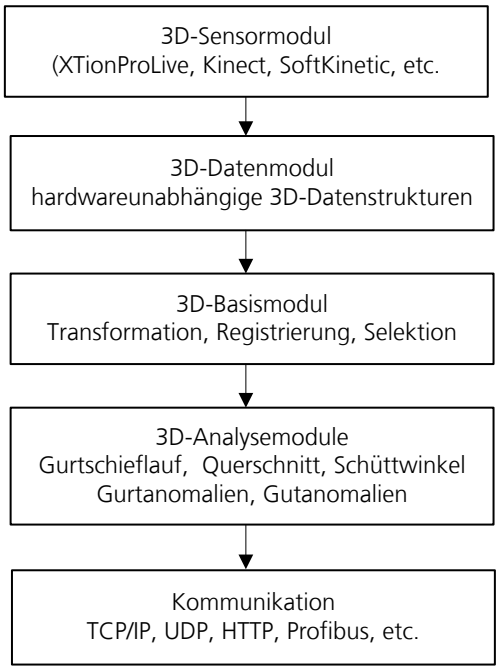


Abbildung 1: Modulares Hard- und Softwarekonzept

Die funktionsspezifischen Module greifen auf registrierte (3D-Basismodul) 3D-Daten zu, die wiederum über hardwareunabhängige Schnittstellen (3D-Datenmodul) Zugriff auf die hardwarespezifischen Sensordaten (3D-Sensormodul) haben. Die funktionsspezifischen Module (3D-Analysemodule) sind demnach robust gegenüber Sensorevolutionen und bildtechnologischen Entwicklungen (bspw. Multisensorsysteme). Eine zukünftige Erweiterung des Systems um weitere funktionsspezifische Module ist einfach und flexibel umsetzbar. Die Übertragung der von den 3D-Analysemodulen im Sensor berechneten Parameter (Tabelle 2) übernimmt konzeptionell ein Kommunikationsmodul. Die Ausgestaltung dieses Moduls (zur Steuerung) ist noch nicht fixiert. Derzeit wird geprüft, welche externen Schnittstellen notwendig sind (TCP/IP, http, Profibus, analog etc.).

4 Aktueller Entwicklungsstand des multifunktionalen Sensorsystems

4.1 Prototyp des Sensorsystems

Für die Entwicklung und Validierung der Überwachungsfunktionen wurde ein erster Prototyp des multifunktionalen, kompakten Sensors erstellt. Bei dem Prototyp handelt es sich um die Installation des Tiefenbildsensors in einem Gehäuse mit dem Schutzgrad IP67. Das Gehäuse ermöglicht den Einsatz des Tiefenbildsensors unter realen Umweltbedingungen (Nässe, Staub, Schmutz). Für die Datenübertragung wurde der Tiefenbildsensor via USB 2.0 mit einer Rechnereinheit verbunden. Die Abbildung 2 zeigt den installierten Prototypen im Kies- und Baustoffwerke Barleben GmbH.

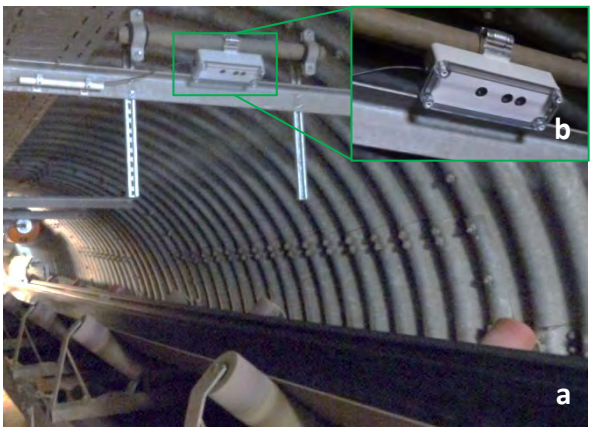


Abbildung 2: Prototyp im industriellen Umfeld. (a) Gurtband im Tunnel (b) Befestigung des Sensors über dem Gurt

4.2 Funktion Gurtschieflauf

Als erste Funktion des Sensorsystems wurde die Überwachung des Gurtschieflaufs entwickelt. Zu diesem Zweck werden die Soll- und die Ist-Position der Gurtkanten mit einander verglichen und anhand der Abweichung entlang der X-Achse der Gurtschieflauf bestimmt.
Wichtig für die Funktion ist eine stabile Segmentierung des Gurtes, insbesondere seiner Kanten. Die Segmentierung erfolgt in drei Schritten und der Kombination von 2D- und 3D-Bildverarbeitung. Im ersten Schritt wird der

Gurt mit Hilfe von Tiefenfiltern extrahiert und binär abgebildet. Im zweiten Schritt erfolgt die Konturerkennung des Gurtbands, welche für spätere Berechnungen als Ausgangsmaske (2D) dient. Im dritten Schritt wird die gurtzugehörige Punktewolke unter der Verwendung der Ausgangsmaske bestimmt. Nach der erfolgreichen Segmentierung des Gurtbands wird ein Referenzmodell, durch mehrmaliges Anlernen des Hintergrundes (Gurtband im leeren Zustand), angelegt. Für die Durchführung des Soll-Ist-Vergleichs werden die Positionen der beiden Gurtkanten aus der aktuellen Datenaufnahme bestimmt und mit dem zuvor abgespeicherten Referenzmodell verglichen. Bei der Überschreitung des zuvor definierten Schwellenwertes erfolgt eine Meldung an das übergeordnete System. Alternativ ist das System in der Lage kontinuierlich die Soll-Ist-Differenz des Fördergutes an das übergeordnete System zu melden.

4.3 Funktion Gutquerschnitt und Gutvolumen

Die Erfassung des Gutquerschnitts basiert auf dem Differenzverfahren und berechnet den Querschnitt des geförderten Schüttgutes aus dem erfassten Gurt im leeren Zustand und der aktuellen Bildaufnahme. Für die Ermittlung des Querschnittes wird ein definierter Messbereich in äquidistante Teilabschnitte zerlegt und mit nummerische Integration über Rechteckverfahren berechnet. Abbildung 3 verdeutlicht das Funktionsprinzip dieser Integration.

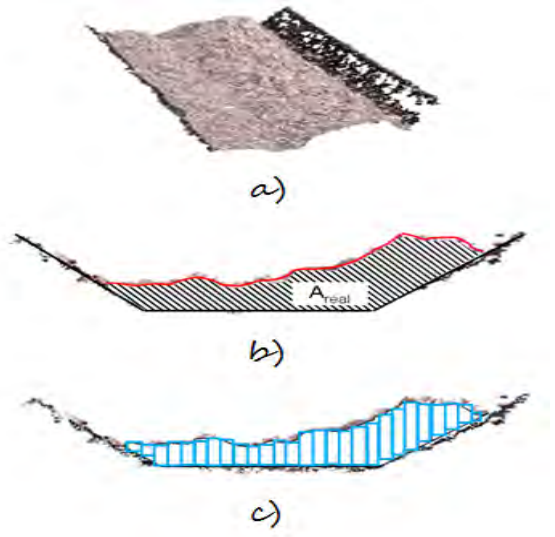


Abbildung 3: a) 3D-Scan des Schüttguts, b) realer Querschnitt des Schüttguts, c) nummerische Integration über Rechteckverfahren

Aus dem berechneten Gutquerschnitt lässt sich, unter Berücksichtigung der Gurtgeschwindigkeit und der Zeit, das abtransportierte Gutvolumen bestimmen.

Abbildung 4 fasst den Ablauf der Berechnungen (Gutquerschnitts und Gurtschieflauf) schematisch zusammen.

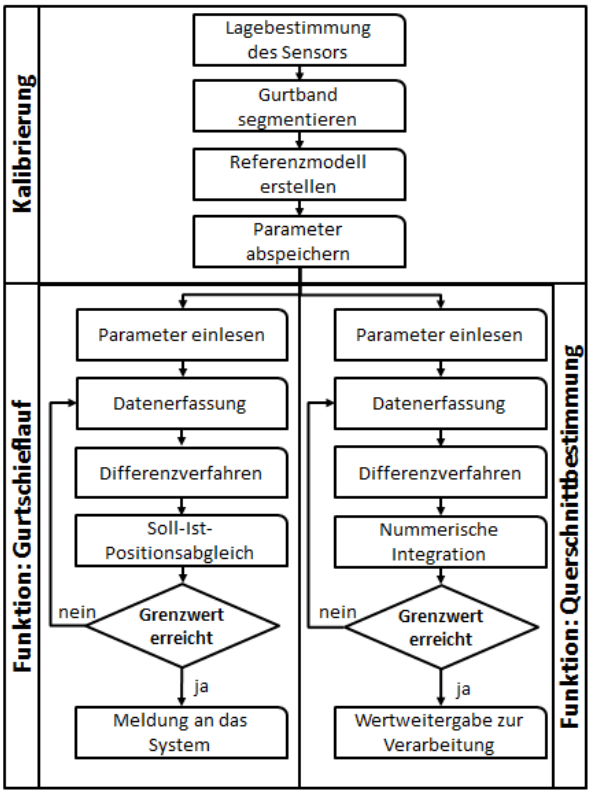


Abbildung 4: Ablauf der Programme

5 Evaluation

Während der Entwicklungszeit wurden die Funktionen Gurtschieflauf, Querschnitts- und Volumenbestimmung auf ihre Messgenauigkeit untersucht. Die Untersuchungen fanden unter Laborbedingungen statt und wurden unter realen Bedingungen verifiziert.

5.1 Evaluation Gurtschieflauf

Für die Untersuchung der Messgenauigkeit bei Gurtschieflauf wurde ein statisches Setup im Labor eingerichtet, welches die Verschiebung der Beobachtungsoberfläche entlang der X-Achse erfasste. Zu diesem Zweck wurde der Tiefenbildsensor in einer Höhe von 1,8 m über einer Holzplatte angebracht und die Sollposition erfasst. Anschließend wurde die Platte (ca. 60 cm breit) manuell in 1 cm Schritten bis 10 cm verschoben. Tabelle 3 zeigt das zusammengefasste Ergebnis des durchgeführten Experiments.

Realer Gurtposition	Sensormesswert (Mittelwert)	Abweichung
0 cm	0,5 cm	0,5 cm
1 cm	1,3cm	0,3 cm
2 cm	2,3 cm	0,3 cm
3 cm	3,1 cm	0,1 cm
4 cm	4,2 cm	0,2 cm
5 cm	5,1 cm	0,1 cm
6 cm	6,2 cm	0,2 cm
7 cm	7,2 cm	0,2 cm
8 cm	7,9 cm	0,1 cm
9 cm	8,7 cm	0,3 cm
10 cm	9,7 cm	0,3 cm

Tabelle 3: Messgenauigkeit Gurtschieflauf

Wie aus der Tabelle 3 ersichtlich, besitzt das Messsystem eine Genauigkeitsabweichung von ca. ±5 mm. Nach dem durchgeführten Laborexperiment wurde das Sensorsystem unter realen Messbedingungen im Kieswerk Barleben GmbH installiert. Hier wurde das Messsystem in einer Höhe von 80 cm in einem Tunnel über Fördergurt angebracht und überwachte die Gurtkantenposition. Das Messsystem erwies sich in der rauen Umgebung (Nässe, Schmutz und Temperaturwechsel) auch nach mehrmonatigem Versuchszeitraum als lauffähig.

5.2 Evaluation Gutquerschnitt und Gutvolumen

Um die Messgenauigkeit der Gutquerschnittserfassung zu bestimmen, wurde ein Laborexperiment durchgeführt. Bei diesem Experiment wurden Objekte (zwei unterschiedliche Quader) mit bekannten Abmaßen auf einem Förderband mit einer definierten Geschwindigkeit transportiert. Das Messsystem erfasste dabei kontinuierlich den Fördergurt und berechnete über die nummerische Integration die Querschnitte der Objekte. Dieses ermöglichte einen direkten Vergleich zwischen dem tatsächlichen und dem gemessenen Querschnitt der Objekte. Die Tabelle 4 zeigt das Ergebnis der durchgeführten Messung.

Objekt	Quader 1	Quader 2
Realer Querschnitt	810 cm²	105 cm²
Gemessener Querschnitt	762 cm²	101 cm²
Genauigkeit	94,1%	96,2%

Tabelle 4:Messgenauigkeit Querschnitterfassung

Wie aus der oberen Tabelle hervor geht, erfasst das Messsystem mit einer Genauigkeit von ca. 95% den Objektquerschnitt. Ähnliche Resultate konnten auch unter realen Messbedingungen bestätigt werden. Hierbei wurde im Kieswerk das abtransportierte Volumen von Kies auf Basis des Querschnittes und der Gurtgeschwindigkeit bestimmt. Parallel dazu erfasste eine Bandwaage das abtransportierte Gewicht. Durch die Bestimmung der Dichte des Stoffes wurde das Referenzvolumen errechnet.

Die Tabelle 5 zeigt die Messergebnisse zur Volumenberechnung unter realen Bedingungen.

	Parameter	#01	#02	#03
Bandwaage	Gewicht	12 t	28 t	30 t
	Stoffdichte	1,6 t/m³	1,6 t/m³	1,6 t/m³
	Berechnetes Volumen	7,5 m³	17,5 m³	18,8 m³
Messsystem	Gurtgeschwindigkeit	3,2 m/s	3,2 m/s	3,2 m/s
	Ermitteltes Volumen	7,1 m³	16,8 m³	18,0 m³
	Abweichung	94,6 %	96,0 %	95,7 %

Tabelle 5: Messgenauigkeit Volumenerfassung

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Entwicklung eines multifunktionalen Messsensors für die Schüttguttechnik wurden zwei Funktionen implementiert. Die Funktionen Gurtschieflauf und Gutquerschnitts bzw. Gutvolumen lassen sich auf Basis der Gurtgeschwindigkeit parallel und echtzeitnah auf einer Rechnereinheit ausführen. Ebenfalls erfolgten erste Laboruntersuchungen zur Systemgenauigkeit.

Für die Zukunft sind die Entwicklung und die Implementierung der Funktionen Schüttwinkel, Gurtgeschwindigkeit und Oberflächenbetrachtung geplant. Diese Funktionen sollen ebenfalls parallel und echtzeitnah auf dem Messsystem arbeiten.

Zeitgleich soll eine Weiterentwicklung der Hardware erfolgen. So soll die Rechnereinheit des Messsystems ebenfalls in das IP67-Schutzgehäuse des Tiefenbildsensors integrieren und mit mehreren industriellen Schnittstellen (PROFIBUS, Ethernet oder analog) ausgestattet werden. Dies ermöglicht die Kommunikation zwischen dem multifunktionalen, kompakten Sensor und dem übergeordneten System bzw. anderen Sensoren (z.B. Gurtgeschwindigkeit für bessere Volumenberechnung).

Weiterhin soll die Leistung der integrierten Rechnereinheit an die Bedürfnisse des Sensors angepasst werden, so dass die vorgestellten Funktionen ohne Einschränkungen auf dem System lauffähig bleiben und trotzdem den wirtschaftlichen Ansprüchen der Industrie genügen. Das multifunktionale Sensorsystem reduziert den Integrations- und Wartungsaufwand einer Förderbandanlage im Schüttgutbereich. Der Einsatz von Low-Cost-Tiefenbildtechnologie im kompakten Sensor verschafft zusätzlich wirtschaftliche Vorteile gegenüber Mehrsensor-Systemen.

7 Literaturquellen

[1] Voigt, M.; Borstell, H.: Effiziente Transportlogistik durch kontinuierliche Laderaumüberwachung, In: Schenk, M. ; Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -Automatisierung -IFF-, Magdeburg: Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -Automatisierung. Leistungen und Ergebnisse. Jahresbericht 2010, Magdeburg: Fraunhofer IFF, 2011, S.70-71.

[2] Örebro University: Evaluation of available sensors, mounting and automatic calibration software package, Örebro University, Sweden, 2012.

[3] J. C .K. Chow, K. D. Ang, D. D. Lichti, and W. F. Teskey: Performance analysis of a low-cost triangulation-based 3D camera: Microsoft Kinect system, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Canada, 2012.

HÖHERE LEISTUNGSFÄHIGKEIT VON LABORZENTRIFUGEN DURCH ROTOREN AUS KOHLEFASERWERKSTOFFEN

Pierre Möllers, M.Sc.
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Virtual Engineering

Dr.-Ing. Uwe Klaeger
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Virtual Engineering

HÖHERE LEISTUNGSFÄHIGKEIT VON LABORZENTRIFUGEN DURCH ROTOREN AUS KOHLEFASERWERKSTOFFEN

Pierre Möllers, M.Sc., Dr.-Ing. Uwe Klaeger, Virtual Engineering, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF

1 Hintergrund

Sowohl in der Chemie- und Pharmaindustrie als auch in der Medizin werden Laborzentrifugen zur Separierung verschiedener Stoffe eingesetzt. Ein zentraler Bestandteil dieser Zentrifugen ist der Rotor, welcher zur Aufnahme der Probengefäße dient. Er ist während der Zentrifugation sehr großen Beanspruchungen ausgesetzt. So wirken bei Drehzahlen von bis zu 20.000 min^{-1} Zentrifugalkräfte, die dem 25.000-fachen der Erdanziehung entsprechen können. Um diesen Belastungen gerecht zu werden, müssen die Rotoren einerseits ein hohes Maß an Laufruhe und Bruchsicherheit sowie andererseits geringe Verformungen garantieren. Zu diesem Zweck eingesetzte konventionelle Rotoren werden gegenwärtig aus speziellen Aluminiumlegierungen angefertigt. Sie lassen sich verhältnismäßig einfach und kostengünstig produzieren, sind aber bezüglich der Belastbarkeit als auch der Rotationsgeschwindigkeit beschränkt. Überdies weisen jene konventionellen Aluminiumrotoren häufig nachteilige Unwuchten auf.

Als Alternative zu den konventionellen Aluminiumrotoren bieten Rotoren in Faserverbundbauweise erhebliches Potenzial. Sie können theoretisch trotz einer geringeren Masse sechsmal höhere Belastungen aufnehmen. Dies wirkt sich positiv auf die Hochlauf- und Standzeiten sowie den Energieverbrauch der Zentrifuge aus. Durch die geringere Masse des Rotors können des Weiteren geringere kinetische Energien und in Folge dessen höhere Rotationsgeschwindigkeiten erreicht werden. Aufgrund der vorwiegend manuellen Fertigung der Faserverbundrotoren in Mischbauweise und der höheren Materialkosten sind sie jedoch kostenintensiver als entsprechende Aluminiumrotoren.

2 Motivation und Zielsetzung

Aus dem erläuterten Kontext ergibt sich die Zweckmäßigkeit zur Entwicklung einer systematischen Produktionsmethodik von Leichtbaurotoren aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen. Stets zu berücksichtigen sind dabei die anisotropen Werkstoffeigenschaften der Kohlenstofffasern. Denn nur unter optimaler Ausrichtung der Fasern in Belastungsrichtung können ihre sehr hohen Zugfestigkeiten und Steifigkeiten bestmöglich ausgenutzt werden [1] S. 66. Allerdings gestaltet sich das bei Kegel- und Freiformflächen diffizil, da die Fasern während des Belegens zum Verrutschen neigen. Die bisher übliche Wickelmethode zur Fertigung von Leichtbauzentrifugenrotoren aus Faserkunststoffverbunden ist zur optimalen Positionierung der Fasern nicht geeignet. Auch weisen die gewickelten Oberflächen technologisch bedingt eine zu hohe Rauheit auf, um eine hinreichende Laufruhe des Rotors zu ermöglichen. Überdies sind die für diese Wickelmethode benötigten Mehrachswickelanlagen sehr kostspielig.

Infolgedessen basiert die neue Produktionsmethode auf der Verwendung von Kohlenstoff-Spiralbändern (Abbildung 1). Diese werden als "gezielte Versteifung von Konstruktionen in den Hauptbelastungsrichtungen" eingesetzt [2] S. 65. Sie sind geometrisch exakt an die Kegelfläche des Rotors anpassbar und können somit hervorragend am Rotor positioniert und gleichsam fixiert werden. Das Potenzial der Fasern wird durch die Belastung in Zugrichtung bestmöglich ausgenutzt.

Eine weitere Möglichkeit zur Optimierung der Rotoreigenschaften besteht in der Verwendung von Füllkörpern. Diese aus einem leichten Schaum gefertigten Einleger sind so im Rotor eingebracht, dass größere nicht notwendige Agglomerationen von CFK vermieden werden können. Die Einleger befinden sich innerhalb der Rotorkonstruktion und sind zwingend vollständig vom Faserverbund umschlossen. Ziel der CFK-Substitution ist in erster Linie eine Massenreduktion des Rotors. Darüber hinaus erscheint eine Kostenminimierung durch niedrigere Materialpreise des Schaumes möglich.

Die Entwicklung der Produktionsmethodik beinhaltet neben den zuvor beschriebenen Merkmalen weitere Besonderheiten zur Optimierung des CFK-Rotors in Mischbauweise. Weiterhin vorgesehen sind:

- Einsatz separat gefertigter, formschlüssig eingebetteter Naben zur Erhöhung der Variabilität.
- Verwendung eines gesondert gefertigten Aerosolringes aus Kunststoff zur Vermeidung von Hinterschneidungen beim Herstellungsprozess des Rotors.

Nach erfolgreicher Umsetzung der Produktionsmethodik werden eine Steigerung der Belastbarkeit von mindestens 10%, eine Erhöhung der zulässigen Drehzahl von ebenfalls 10% und eine signifikante Verringerung der Masse erwartet. Ein weiteres essentielles Ziel ist die hohe Reproduzierbarkeit dieser und weiterer wesentlicher Rotoreigenschaften.

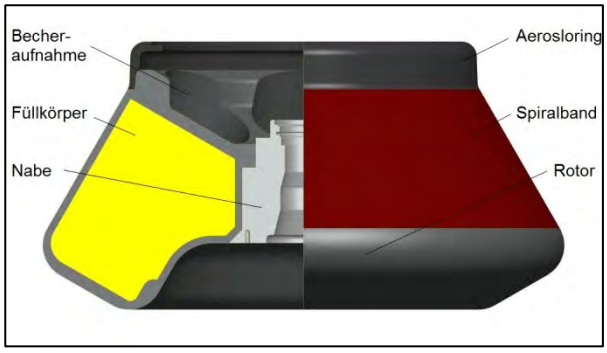


Abbildung 1: CFK-Leichtbaurotor 6x500ml mit umliegend angebrachtem Kohlenstoff-Spiralband, Füllkörpern, Nabe und Aerosolring

3 Entwurf einer systematischen Produktionsmethodik

Der Nachfolgend beschriebene Prozess zum Entwurf der Produktionsmethodik beinhaltet die erforderlichen Entwicklungsschritte zur Generierung des optimierten CFK-Rotors in Mischbauweise.

3.1 Festlegung der Geometrie und Anforderungen

Zunächst müssen die zu betrachtenden Rotorgrößen und -geometrien ausgewählt werden. Das geschieht in Absprache mit dem Projektpartner Carbonic GmbH auf Basis der derzeitigen Nachfrage am Markt. Als besonders erwünscht erweisen sich dabei zwei Rotorgrößen. Zum einen handelt sich um einen Rotor zur Aufnahme von 6 Gefäßen mit je 500 ml Probenvolumen (6 x 500 ml-Rotor) und zum anderen um einen Rotor zur Aufnahme von 14 Gefäßen mit je 50 ml Probenvolumen (14 x 50 ml-Rotor).

Die Generierung und Findung sinnvoller Anforderungen für die CFK-Rotoren stützt sich auf die Untersuchung entsprechender konventioneller Aluminiumrotoren. Von ihnen werden allgemeine, kinematische und geometrische Anforderungen übernommen bzw. entsprechend der Zielsetzung angepasst.

Die nachfolgend beschriebenen Entwicklungsschritte beziehen sich zwecks besserer Nachvollziehbarkeit gänzlich auf den 6 x 500 ml-CFK-Rotor.

3.2 Variantenentwicklung und 3D-Modellierung

Zuerst werden für den 6 x 500 ml-CFK-Rotor zwei Varianten in differentieller Bauweise mit Füllkörpern entwickelt und als CAD-Modell erzeugt. Während Variante 1 auf einem Sandwichaufbau ohne zusätzliche Ringversteifung basiert, verwendet die Variante 2 Schaumfüllkörper und eine Ringversteifung aus Kohlenstoff-Spiralbändern.

Der Aerosolring ist bei beiden Varianten als separates Kunststoffteil ausgeführt, welches mit dem CFK-Rotor verklebt wird. Durch diesen Aufbau werden erstens unerwünschte Hinterschneidungen des Rotors und zweitens unnötig hohe Materialkosten vermieden. Denn angesichts der auf den Aerosolring wirkenden niedrigeren Belastungen ist die Ausführung als kostenintensiver Faserverbund nicht zwingend notwendig.

Weitere wesentliche Punkte bei der Rotorentwicklung sind die formschlüssige Anbindung der Naben sowie die zweckmäßige Gestaltung der Füllkörper. Dies alles erfolgt unter der ständigen Prämisse der fertigungsgerechten Gestaltung des Rotoraufbaus. Denn Defizite der Geometrie, welche erst während der Formwerkzeugauslegung oder gar erst im Fertigungsprozess auftreten, sind mit erheblichem Zeit- und Kostenaufwand verbunden und deshalb so weit wie möglich zu minimieren.

3.3 Energiebetrachtungen und FEM-Analyse

Die beiden entwickelten Varianten des 6 x 500 ml-CFK-Rotors bilden die Grundlage für die folgende Energiebetrachtung. Als Referenzobjekt dient erneut der konventionelle Aluminiumrotor. Die Zielvorgabe für die Rotationsenergie wird für eine Drehzahl von 9.600 U/min auf 94.000 Nm taxiert. Das Ergebnis der Berechnungen weist eindeutig die Variante 2 als jene mit dem größeren Potenzial aus. Nur sie kann eine hinreichende Reduzierung der Rotationsenergie erzielen (Tabelle 1). Das Optimierungspotenzial der Variante 1 ist gemäß den Berechnungen nur sehr unzureichend.

Bauform	Masse [kg]	Rotationsenergie [Nm]	
		Rotor	Differenz zur Vorgabe
Aluminium	17,3	154.246	60.246
Variante 1	8,1	135.208	41.208
Variante 2	7,8	86.426	-7.574

Tabelle 1: Energiebetrachtung der 6 x 500 ml-CFK-Rotorvarianten im Vergleich zum Aluminiumrotor

Im Anschluss an die Energiebetrachtungen kann mit der Untersuchung beider Varianten mittels Finiter-Elemente-Methode fortgesetzt werden. Hiermit können die durch eine Zentrifugation auftretenden Hauptspannungen bestimmt und kritische Stellen des Rotors lokalisiert werden (Abbildung 2). Beispielsweise lässt sich damit die angestrebte Erhöhung des Sicherheitsfaktors von 2,3 (Aluminiumrotor) auf 3,0 (CFK-Rotor) prüfen. Verwendet wird dazu das Analysepaket "Ansys", da es mit dem Tool "Composite PrepPost" umfangreiche Berechnungen von Faserverbunden ermöglicht. Auch bei der FEM-Analyse erweist sich die Variante 1 als ungeeignet, da sie anfälliger gegenüber unerwünschten Verformungen ist.

Sie wird aus diesem Grund von den nachfolgenden Entwicklungsschritten ausgeschlossen.

Im weiteren Verlauf der Entwicklung wird die Rotorgeometrie der Variante 2 soweit angepasst, bis die FEM-Analyse gänzlich positiv abgeschlossen werden kann. D.h. sämtliche an den Rotor gestellten Anforderungen müssen theoretisch erreichbar sein. Der dafür notwendige Optimierungsprozess erfolgt teils iterativ und hat unter anderem auch Auswirkungen auf die 3D-Modellierung im Entwicklungsschritt 3.2.

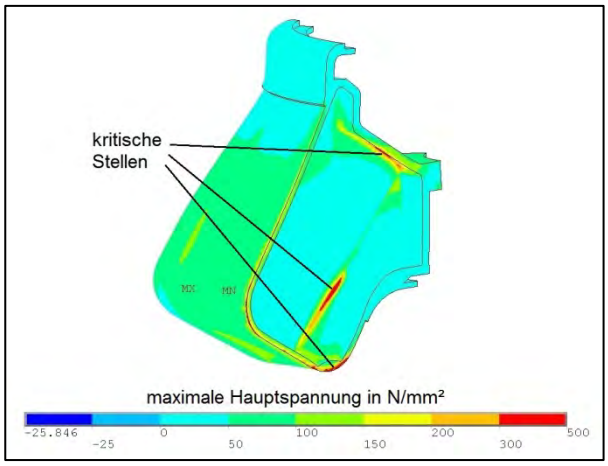


Abbildung 2: FEM-Analyse der maximal auftretenden Hauptspannungen einer Variante des 6 x 500 ml-CFK-Rotors

3.4 Ergebnisse

Die durchgeführten Energiebetrachtungen und FEM-Analysen bescheinigen der Variante 2 des 6 x 500 ml-CFK-Rotors in differentieller Bauweise ausreichend Potenzial bezüglich der Optimierung von Rotationsenergie und aufzunehmenden Beanspruchungen. Der Einsatz einer verstärkenden Ringversteifung ist entsprechend dieser Untersuchungen für das Optimierungspotenzial des Rotors maßgebend. Mit dieser Versteifung kann bei einem Faservolumengehalt von ca. 60% die Masse um bis zu 44% gegenüber dem konventionellen Aluminiumrotor reduziert werden. Dies ist auf die wesentlich geringeren Dichten der CFK-Gelege (1,5 g/cm³) sowie der Schaumfüllkörper (0,13 g/cm³) gegenüber dem Aluminiumrotor (2,7 g/cm³) zurückzuführen.

Die neue Bauform des 6 x 500 ml-CFK-Rotors realisiert in der Theorie summa summarum folgende Vorteile:

- niedrigere Rotormasse
- niedrigere Rotationsenergie
- höhere Drehzahlen
- höhere Zentrifugalbeschleunigungen
- geringerer Energieverbrauch der Zentrifuge
- kürzere Anlauf- und Abbremszeiten
- längere Standzeit der Zentrifuge
- leichtere Handhabung des Rotors
- Korrosionsbeständigkeit
- bessere Ermüdungsfestigkeit
- besseres Crashverhalten

Ferner beinhaltet die Konstruktion insgesamt neun Komponenten und ist damit in Bezug auf die Montage akzeptabel. Die Komplexität der Produktionsschritte ist aus momentaner Sicht unkritisch und eine Rotormontage mit hoher reproduzierbarer Qualität erscheint grundsätzlich möglich.

4 Konstruktive Auslegung der Laminierform und Formwerkzeuge

Nachdem die Rotorgeometrie hinsichtlich der gesetzten Anforderungen optimiert ist, kann mit der Auslegung der Laminierform als auch der Formwerkzeuge begonnen werden. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf einer Form, bei welcher die einzelnen Montageschritte möglichst problemlos und vor allem reproduzierbar durchführbar sind. Das betrifft hauptsächlich die verschiedenen Stadien der Formbelegung mit Fasergewebe. Erfahrungsgemäß wird nur eine vollständig belegte Form durchgängig mit Harz getränkt, was wiederum eine Voraussetzung für einen ausreichenden und homogen verteilten Faservolumenanteil des Rotors ist. Weist der Rotor einen unzulässigen oder zu inhomogen verteilten Faservolumenanteil auf, besteht die Gefahr des Rotorversagens bereits bei normalerweise unkritischen Belastungen.

Zur Evaluierung der angedachten Laminierformgeometrie werden im Optimierungsprozess auch Simulationstechniken eingesetzt. Mit ihnen kann der Belegungsprozess schrittweise simuliert und problematische Stellen oder auch Kollisionen lokalisiert werden. Außerdem werden bereits während des Konstruktionsprozesses erste Formwerkzeuge unter Verwendung von Additive-Manufacturing- Verfahren real erzeugt und auf ihre Praxistauglichkeit erprobt. Hierbei dienen das Selective-Laser-Sintering-Verfahren zur Herstellung der Urmodelle und das Vakuumgießverfahren zur Vervielfältigung der Formwerkzeuge. Speziell die Füllkörper oder auch die Platzhalter der Becheraussparung mit ihren vielen komplexen Freiformflächen lassen sich durch generative Fertigungsverfahren wesentlich schneller und günstiger produzieren als mit konventionellen Fertigungsverfahren (Abbildung 3). Diese konstruktionsbegleitenden Maßnahmen erleichtern die Entwicklung sofort einsatzfähiger Formen und Formwerkzeuge und vermindern kostspielige und zeitintensive Nachbesserungen oder sogar Neuanfertigungen. Zum Beispiel können Übergange zwischen benachbarten Formwerkzeugen auf ihre Belegbarkeit geprüft und im Bedarfsfall optimiert werden.

Abbildung 3: Mittels Selektive-Laser-Sintering gefertigter Platzhalter der Becheraussparung in einem CFK-Rotorsegment

Entsprechend dieser Methodik werden die Laminierform als auch die zusätzlich benötigten Formwerkzeuge entwickelt. Das Ergebnis ist eine mehrteilige Laminierform (Abbildung 4) zur Produktion des 6 x 500 ml-CFK-Rotors im Resin-Transfer-Moulding-Verfahren (RTM-Verfahren). Das Verfahren ist besonders gut für die Fertigung von differentiellen CFK-Bauteilen in einem Arbeitsgang geeignet. Dies allerdings unter der Prämisse, dass die schubfesten Schaum-Füllkörper geschlossene Zellen bzw. eine geschlossene Oberfläche aufweisen [3] S. 212. Auch können mit dem RTM-verfahren sehr komplexe Formen mit sehr hoher Oberflächengüte erzeugt werden [4] S. 99.

5 Prototypenfertigung und -erprobung

Im Anschluss an die Fertigung der Laminierform sowie der Formwerkzeuge kann mit der Produktion erster Funktionsprototypen begonnen werden. Dabei stellt sich die Technologie der Formbelegung mit CFK-Gewebe wie erwartet als hochkomplex dar. Sie ist jedoch für eine hohe Reproduzierbarkeit der Rotoren und ihrer Eigenschaften grundlegend. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, werden diverse Vorgehensweisen entwickelt und auf ihre Eignung geprüft. Letztendlich kommen vielfach kostspielige CFK-Gelege zum Einsatz und ersetzen damit die preisgünstigeren CFK-Gewebelagen. Das CFK-Gelege lässt sich ohne zusätzlich einzubringende und anschließend zu vernähende Stanzungen verarbeiten und ist somit wesentlich einfacher und schneller in der Montage einsetzbar. Außerdem ist eine leichte Erhöhung der Steifigkeit sowie eine vergleichsweise geringere Delaminationsneigung der CFK-Lagen zu erwarten [3] S. 223.

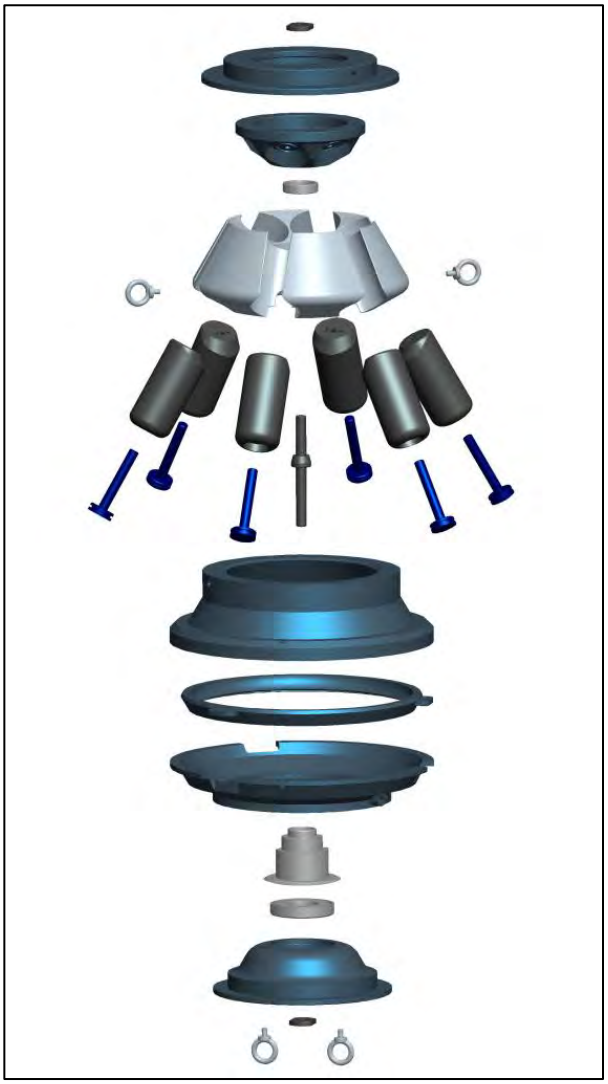


Abbildung 4: Explosionsdarstellung der endgültigen Laminierform einschließlich der benötigten Formwerkzeuge des 6 x 500 ml-CFK-Rotors

Nach dieser Anpassung wird die Produktion von Funktionsprototypen für die Mustererprobung fortgesetzt (Abbildung 5). An ihnen lassen sich Parameter wie Masse, Belastbarkeit, Laufruhe, Oberflächenbeschaffenheit, Faservolumenanteil und Maßhaltigkeit der Formen speziell unter dem Gesichtspunkt der Reproduzierbarkeit untersuchen. Dabei wird eine bis zu 50 % geringere Masse bei einer bis zu 20 % höheren Belastbarkeit ermittelt.

Die Maßhaltigkeit liegt bei 95 % der Rotoren im definierten Toleranzfeld. Die Laufruhe verbessert sich um 20 % und auch die erzielten Oberflächengüten sind hinreichend. Nicht zufriedenstellend hingegen ist die Reproduzierbarkeit der Rotorformdurchtränkung, was sich in vereinzelt auftretenden Lufteinschlüssen wiederspiegelt.

Abbildung 5: Funktionsprototyp des 6 x 500 ml-CFK-Rotors

6 Zusammenfassung und Ausblick

Innerhalb dieses Projektes wurden zunächst Konzepte für einen Zentrifugenrotor in Faserverbundbauweise entwickelt, untersucht und hinsichtlich ihres Potenzials bewertet. Dazu erfolgte die Untersuchung von Energieberechnungen und FEM-Analysen. Dem schloss sich eine Optimierung der Rotorgeometrie bezüglich Masse, Belastbarkeit und Fertigungsmöglichkeit an. Nachfolgend konnten sowohl die Laminierform als auch die Formwerkzeuge ausgelegt und hinsichtlich der Produktionsmethodik optimiert werden. Hierbei zeigten sich verschiedene Additive-Manufacturing-Verfahren als zielgerichtet einsetzbare Kontrollmedien sehr gut geeignet. So konnten erste Funktionsprototypen schnell bereitgestellt und untersucht werden. Hierfür war die Erarbeitung und Anpassung einer Belegungstechnologie erforderlich.

Die theoretischen, durch Simulationen und Berechnungen ermittelten, möglichen Rotorparameter wie z.B. Masse, Belastbarkeit, Laufruhe und Oberflächengüte ließen sich vornehmlich realisieren. Auch deshalb wird die Produktionsmethodik als grundsätzlich für die Serienfertigung geeignet angesehen. Entscheidend dafür ist allerdings die Optimierung der Reproduzierbarkeit einer hinreichenden Faserdurchtränkung.

Weitgehend simultan erfolgte die Entwicklung, Fertigung und Erprobung für den 14 x 50 ml-CFK-Rotor. Die Ergebnisse kongruieren mit den des 6 x 500 ml-CFK-Rotors und bestätigen somit die erzielten Verbesserungen aber auch die Optimierungsmöglichkeiten.

Zur Lösung der identifizierten Probleme läuft gegenwärtig ein neues Projekt an, welches ein innovatives Fertigungsverfahren für komplexe CFK-Bauteile generieren soll. Schwerpunkte der Entwicklung sind einerseits die Vermeidung unerwünschter Lufteinschlüsse und andererseits eine signifikante Beschleunigung des Fertigungsprozesses. Dies beinhaltet auch die Transformation von manuellen Montageschritten in teil- oder vollautomatisierte Prozesse.

Basierend auf der Marktnachfrage ist eine analoge Entwicklung von 6 x 100 ml-, 6 x 250 ml- und weiterer CFK-Rotorvarianten denkbar.

7 Literatur

[1] Wiedemann, Johannes: Leichtbau 2: Konstruktion. Berlin: Springer-Verlag, 1996

[2] Klein, Bernd: Leichtbau-Konstruktion - Berechnungsgrundlagen und Gestaltung. Braun schweig: Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, 2000

[3] Flemming, Manfred; Ziegmann, Gerhard; Roth, Siegfried: Faserverbundbauweisen - Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix. Berlin: Springer-Verlag, 1999

[4] Neitzel, Manfred; Breuer, Ulf: Die Verarbeitungstechnik der Faser-Kunststoff-Verbunde. München: Carl Hanser Verlag, 1997

PLATTFORMENTWICKLUNG ZUR AUTOMATISIERTEN MIKROSKOPBILDAUFNAHME, BILDSEGMENTIERUNG UND -ANALYSE

Tobias Baum
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF,
Biosystems Engineering

PLATTFORMENTWICKLUNG ZUR AUTOMATISIERTEN MIKROSKOPBILDAUFNAHME, BILDSEGMENTIERUNG UND -ANALYSE

Tobias Baum, Biosystems Engineering, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF

1 Einleitung und Motivation

Ein immer wiederkehrendes Problem in der Landwirtschaft ist die Erkrankung von Nutzpflanzen, welche durch Verwendung von genetisch homogenen Arten (u.a. Bedingung für die technisch automatisierte Ernte) an Häufigkeit und Verbreitung weiter zunehmen. Zudem wird erwartet, dass durch den Klimawandel weitere Krankheiten in ursprünglich kühlere Breiten einwandern (Anderson et al. (2004)). Mehltau ist einer der größten Krankheitserreger in Getreiden. Der durch Echten Mehltau verursachte Ertragsrückgang kann bis zu 20% betragen (Atzema et al. (1998); Rasmusson (1985); Jørgensen (1994)).

Die hier vorgestellten Technologien und Methoden beschreiben ein Entwicklungskonzept für die vollautomatische Mirkoskopbildaufnahme, für die Bildsegmentierung und -anaylse sowie für die quantitative Beschreibung der Interaktion von Pflanzen und ihren Pathogenen.

Gabi-Phenome und das Nachfolgeprojekt Barley Fortress beinhalten u.a. die Weiterentwicklung einer Hochdurchsatz-Screening-Plattform (Ihlow (2006)) zur Analyse der Host-Pathogen-Interaktion von Pflanzen und deren Pathogenen (z.B. Gerste und Mehltau). Die auf einem Objektträger (Abk.: OT) liegenden abgeschnittenen Gerstenblätter (ca. 3-4 cm) werden hierfür mit Pilzsporen inokuliert, wonach die Interaktion zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach Inokulation im Hochdurchsatzbetrieb (3 Blätter pro OT; 8 OTs pro Durchlauf) anhand eines Bildanalyseverfahrens quantitativ beschrieben werden soll.

2 Material & Methoden

2.1 Plattform und Umsetzung

Im Zentrum der Plattform befinden sich ein Mikroskop mit motorisiertem Filter- und Objektivrevolver, eine hochauflösende Mikroskopkamera sowie ein motorisierter Objekttisch mit bis zu 8 Bänken. Durch die Möglichkeit der X-Y-Z-Positionierung können Autofokus, Fokusstacking und Mosaikbilder realisiert werden. Auf Basis der aufgenommenen Bilddaten erfolgen Bildsegmentierung und -analyse (Baum et al. (2011)).

Die Umsetzung des Konzeptes erfolgt hochgradig modular, um im Falle einer Anpassung an neue Aufgabenstel-

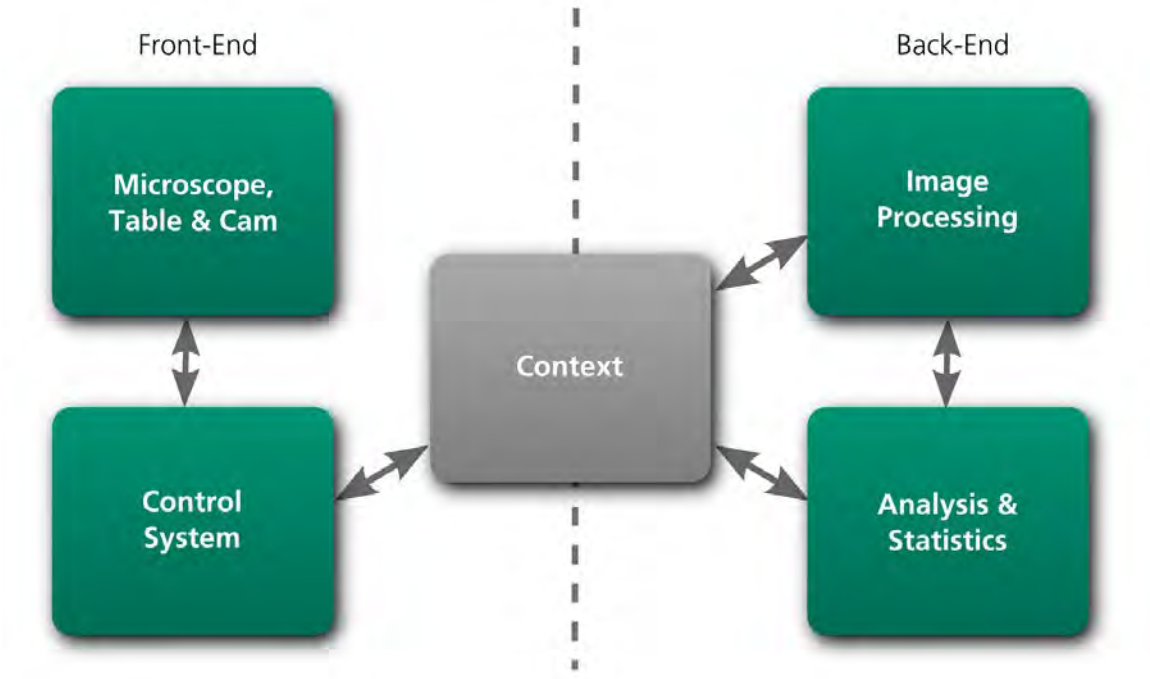


Abbildung 1: Systemübersicht - Die Bildaufnahme erfolgt durch ein automatisiert gesteuertes Mikroskop. Die Bildsegmentierung und die Analyse finden im Anschluss daran statt. Der Kontext steuert das System und beinhaltet alle notwendigen anwendungsspezifischen Informationen. Sowohl Front-End als auch Back-End können ohne Kontext separat mittels Nutzersteuerung für weniger komplexe Problemstellungen (statisches Screening oder Analyse eines manuell aufgenommenen Bildstapels) verwendet werden.

lungen viele Programmteile wiederverwendbar zu gestalten und den Aufwand für Änderungen minimal zu halten. Die geplante Nutzersteuerung/GUI auf Basis eines Client-Server-Models ermöglicht den Einsatz der Plattform in unterschiedlichen Szenarien (Fernzugriff, Tablet). Entwicklungsleistung (Bildverarbeitung, Statistik) und Implementierung (Screening-Plattform) erfolgen in der gleichen Entwicklungsumgebung. Die anfallenden Lizenzen sind in der Art gewählt, dass nachfolgende Aufwendungen (Projektarbeit, Einarbeitung oder Kommerzialisierung) minimal gehalten werden können. Heuristische Verfahren wie genetische Algorithmen zur Parameteroptimierung können unterstützend genutzt werden, um die bestehenden Segmentierungsalgorithmen auf Basis von Referenzdatensätzen für neue Anwendungsbereiche zu adaptieren.

2.2 Segmentierungsalgorithmus

Die Aufgabe des Segmentierungsalgorithmus ist das Trennen von Pathogen (Vordergrund) und dem den Pilz umgebenen Zellgewebe (Hintergrund) im Mikroskopbild, um geometrische Merkmale des Pilzes anhand einer eines mathematisch/logischen Modells berechnen zu können. Der Segmentierungsprozess des Bildes resultiert in ein binäres Bild, in dem der Hintergrund zu Null und der Vordergrund zu Eins gesetzt sind. Auf Basis dieses Binärbildes lassen sich jetzt die Pixel des Originalbildes dem Hintergrund oder dem Vordergrund zuordnen. Das Binärbild ist in Kombination mit dem Originalbild die Grundlage für weitere Analyseschritte.

Im Bereich der Hellfeld-Mikroskopie wurde ein Vorschlag für einen solchen Segmentierungsalgorithmus von Seiffert und Schweizer (2005) gemacht, Auf dessen Basis die hier vorgestellten Anpassungen und Verbesserungen umgesetzt sind. Um das Ziel von HyphArea mehrere Bildprotokolle und Host-Pathogen-Systeme zu unterstützen, zu erreichen, soll der im Folgenden beschriebene Segmentierungsalgorithmus als Grundlage für die weitere Anpassung dienen. Grundlegendes Verständnis der einzelnen Bildverarbeitungsschritte wird in Gonzalez und Woods (2002) und Jähne (2005) vermittelt.

Nach der Normierung der Bilddaten und einer Farbraumtransformation (Abb.: 2.B) wird mittels Tophat-Transformation (Abb.: 2.C) und adaptiver Schwellwerte eine Vorsegmentierung (Abb.: 2.D) erstellt. Sukzessive werden nun mittels Medianfilter und morphologischer Schließung Rauschen (Abb.: 2.E) und kleine Fragmente (Abb.: 2.F) entfernt. Im Anschluss daran werden die verbliebenen Objekte gelabelt (Abb.: 2.G). Das gelabelte Bild dient nun als Basis für eine Klassifikation zum Finden von Bereichen besonderen Interesses. Diese Bereiche werden aus den Originaldaten ausgeschnitten und größenadaptiv segmentiert, um anschließend wieder in den Gesamtbildkontext zurückgeführt zu werden. Auf Basis des resultierenden Bildes findet eine erneute Klassifikation in der Form statt, dass nach Möglichkeit nur noch richtig-positive Objekte (Kolonien) zurückbleiben. Im Rahmen der (blattspezifischen) Analyse erfolgt die Vermessung gefundener Objekte (Kolonien) anhand einfacher Merkmale wie Fläche, Umfang, konvexer Hüllkurve sowie geometrischer Verteilung. Aber auch komplexe Merkmale, die jedoch einer anwendungsorientierten (biologischen) Interpretation bedürfen, sind denkbar, wie z.B. Verzweigungsbäume oder Fourierdesktriptoren.

2.3 Automatisierte und effiziente Anpassung an weitere Problemstellungen

Ein Ziel der Plattform soll es sein, eine effiziente Anpassung des bestehenden Segmentierungsalgorithmus auf andere, neue Bilddaten vornehmen zu können. Um dieses Ziel zu erreichen, werden die Parameter (Schwellwerte, Filtergrößen, Klassifikatoren) heuristisch optimiert. Solche Optimierungsprobleme können im Allgemeinen als Suchproblem aufgefasst werden. Die Informationswissenschaften haben bis heute eine Fülle an Suchalgorithmen hervorgebracht. Im Besonderen haben sich jedoch die Klasse der Genetischen bzw. Evolutionären Algorithmen empfohlen, welche sich intuitiv verstehen lassen, einfach parallel zu implementieren sind und eine akzeptable Performance auf einem breiten Anwendungsgebiet liefern. Bekannt wurden die Genetischen Algorithmen durch die Arbeit von Holland (1992). Allerdings sind deren zugrunde liegende Prinzipien, wie das zufällige Erzeugen von Lösungen eines Suchproblems und deren Optimierung bezüglich einer Optimierungsbedingung, seit Darwin (1859) unter dem Begriff "Evolution" bekannt. Für eine tiefergehende Einführung empfiehlt sich die Lektüre von Goldberg (1989).

Das hier verwendete Verfahren kann wie folgt beschrieben werden. Die in der Segmentierung verwendeten Parameter bzw. Schwellwerte sowie deren obere und untere Schranken ergeben einen Vektor, welcher als Individuum bezeichnet wird. Jedes Individuum stellt eine potentielle Lösung des Suchproblems dar. In der Initialisierungsphase wird eine Gruppe solcher Individuen zufällig erzeugt. Eine solche Gruppe wird als Population bezeichnet. Jedes Individuum der Population wird bezüglich seines Erfolges als Lösung für das Suchproblem ausgewertet. Dieser auch als Fitness bezeichnete Wert berechnet sich aus der Ähnlichkeit eines segmentierten Bildes und der dazugehörigen manuell erstellten Referenz. Das Ähnlichkeitsmaß berechnet sich aus der RMS (Engl.: root mean square, Dt.: mittlere quadratische Abweichung) von Sensitivität und Spezifität der binären Klassifikation. Anschließend werden die besten Individuen einer Population ausgewählt, überkreuz rekombiniert und mittels

Mutation variiert. Diese neuen Individuen stellen die nächste Generation dar.

Dieser iterative Prozess endet, sobald ein Abbruchkriterium erfüllt ist, welches durch Kreuzvalidierung bestimmt ist. Dafür wird der für die Optimierung verwendete Bilddatensatz in einen Trainingssatz und einen Testsatz aufgeteilt. Das Optimierungsverfahren läuft solange, wie die sich die Fitness auf beiden Datensätzen verbessert, d.h. wenn die Fitness auf dem Testsatz wieder beginnt sich zu verschlechtern, dann wird der Optimierungsprozess beendet.

3 Relevanz & Ausblick

Zwar ist die hier vorgestellte Plattform in der Phytopathologie (Host-Pathogen-Interaktion) einmalig, allerdings existieren in anderen Bereichen (Biologie, Medizin, Materialforschung) bereits Lösungen mit unterschiedlichem Automatisierungsgrad. Problemübergreifende Lösungen besitzen i.d.R. eine teilautomatisierte Bildaufnahme, jedoch eine manuelle/semiautomatische Bildverarbeitung (manuelle Bereichsauswahl oder Schwellwertbildung). Problemspezifische vollautomatisierte Lösungen bedürfen nach wie vor eines hohen Entwicklungsaufwandes und damit verbunden einer schlechten Vorhersagbarkeit der Kosten. Bei der hier vorgestellten Technologie wird versucht, neben der Entwicklung neuer Methoden in der Phytopathologie auch Entwicklungskonzepte zu verwenden, die zur Kostenreduktion und besseren Kostenkalkulation im Bereich vollautomatisierter Mikroskopiebildakquise und -bildanalysesysteme beitragen, um somit weitere Anwendungsbereiche zu erschließen.

Die hier vorgestellte Technologie soll mit einem möglichst geringen Aufwand in der Lage sein, neue Bereiche zu erschließen. Diese lassen sich in 3 Kategorien einordnen. Im engeren Sinne könnten andere Getreide als Gerste, wie Weizen, Roggen, Dinkel, aber auch Reis oder Mais, als Host-Systeme verwendet werden. Die Blätter von unterschiedlichen Getreiden, wie z.B. Reis und Magnaporthe, werden von z.T. unterschiedlichen Pathogenen befallen. Im weiteren Sinne wäre es nun denkbar, die Host-Pathogen-Interaktion in anderen Nutzpflanzen als Getreiden zu untersuchen. Als wesentlich könnten hier einheimische Nutzpflanzen wie Raps, Leguminosen und Kartoffeln betrachtet werden. Hier gilt jedoch darauf zu achten, dass die Pathogene in anderen Geweben bzw. Pflanzenteilen auftreten können als den bisher verwendeten Blättern bei Gerste, sodass neben der Anpassung der Bildverarbeitung auch eine andere Bildaufnahmetechnologie von Nöten sein könnte. Im weitesten Sinne könnte eine solche Plattform für die Analyse einer Vielzahl von anderen röhrenförmigen Strukturen in bio-medizinischen Präparaten oder Bilddaten (Dendriten, Wurzeln, Nerven, Blutgefäßen, etc.) eingesetzt werden. Hierbei gilt es jedoch zu beachten und zu überprüfen, inwiefern eine Vollautomatisierung notwendig ist und wie aufwendig und kostenintensiv die Anpassung der Bildaufnahme und Bildanalyse sind.

4 Literaturverzeichnis

[1] P.K. Anderson, A.A. Cunningham, N.G. Patel, F.J. Morales, P.R. Epstein, and P. Daszak. Emerging infectious diseases of plants: pathogen pollution, climate change and agrotechnology drivers. Trends in Ecology & Evolution, 19(10):535–544, 2004.

[2] J.L. Atzema, P. Damage, and P. Protection. Durability of mlo resistance in barley against powdery mildew caused by Erysiphe graminis f. sp. hordei. PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 1998.

[3] T. Baum, A. Navarro-Quezada, W. Knogge, D. Douchkov, P. Schweizer, and U. Seiffert. Hypharea - automated analysis of spatiotemporal fungal patterns. Journal of Plant Physiology, 168(1):72–78, 2011.

[4] D.E. Goldberg. Genetic Algorithms in Search and Optimization. Addison-wesley, 1989.

[5] Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods. Digital Image Processing (2nd Edition). Prentice Hall, January 2002. ISBN 0201180758.

[6] J.H. Holland. Adaptation in natural and artificial systems. MIT press Cambridge, MA, 1992.

[7] A. Ihlow. Ein Hochdurchsatz-Screeningsystem zur Objekterkennung in Mikroskop-Farbbildern im Rahmen der Analyse pflanzlicher Pathogenresistenz. PhD thesis, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Universitätsbibliothek, 2006.

[8] B. Jähne. Digitale Bildverarbeitung. Springer Verlag, 2005. ISBN 3540249990.

[9] JH Jørgensen. Genetics of powdery mildew resistance in barley. Critical Reviews in Plant Sciences, 13(1):97–119, 1994.

[10] DC Rasmusson. Barley. American Society of Agronomy. Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Publishers, Madison, Wisconsin, pages 1–522, 1985.

[11] U. Seiffert and P. Schweizer. A pattern recognition tool for quantitative analysis of in planta hyphal growth of powdery mildew fungi. Molecular Plant-Microbe Interactions,18(9):906–912, 2005.

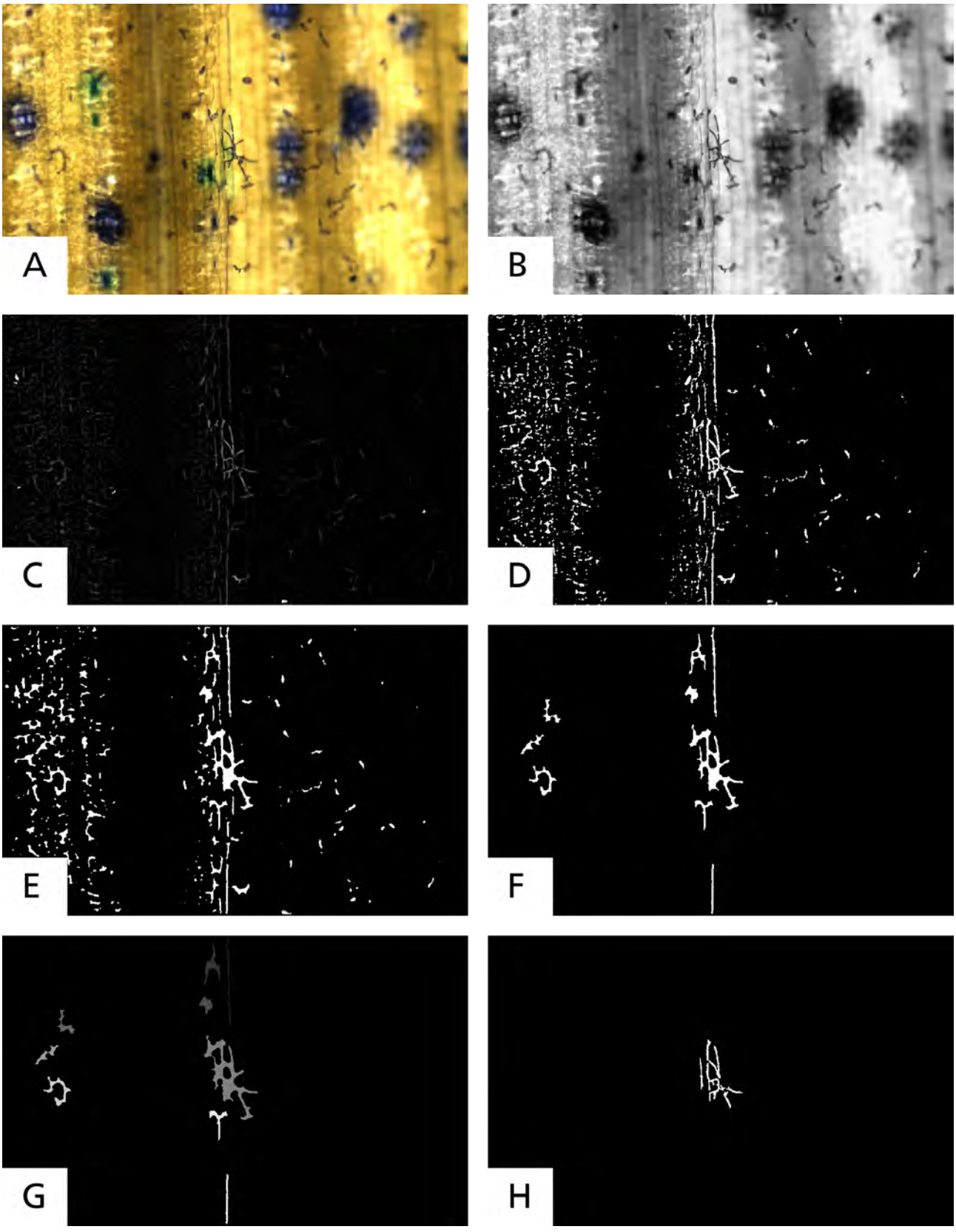


Abbildung 2: Segmentierungprozess - Abbildung A stellt das zu segmentierende Original dar, das nach B als Graustufenbild farbtransformiert wird. Die Tophat-Transformation von B liefert C. Welches anschließend mittels Schwelwert in ein Binärbild D gewandelt wird. In E und F wird mittels Filtern Rauschen und kleine Fragmente entfernt. Die restlichen Objekte werden gelabelt (G) und aus A ausgeschnitten und größenadaptive segmentiert und anhand verschiedener geometrischer Merkmal klassifiziert. Teilbild H stellt das Resultat der Segmentierung dar.

ENTWICKLUNG EINES INNOVATIVEN PROTOTYPS ZUR UMWANDLUNG VON BIOGAS UND BIOETHANOL IN WASSERSTOFF

Dipl.-Ing. Torsten Birth
Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Prozess- und Anlagentechnik

Dr. rer. nat. Wolfram Heineken
Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Prozess- und Anlagentechnik

ENTWICKLUNG EINES INNOVATIVEN PROTOTYPS ZUR UMWANDLUNG VON BIOGAS UND BIOETHANOL IN WASSERSTOFF

Dipl.-Ing. Torsten Birth, Dr. rer. nat. Wolfram Heineken, Prozess- und Anlagentechnik,
Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF

1 Zukunft der Bioenergie

Die fossilen Brennstoffvorräte werden den jährlichen Anstieg des Energiebedarfs (ca. 2 %)[1-2] der Weltbevölkerung nicht decken. Alternativ kann dies nur durch regenerative Energiequellen ermöglicht werden[3]. Eines der vielfältigsten Standbeine im Bereich der erneuerbaren Energien, neben der Nutzung von Sonne, Wind und Wasser sowie Erdwärme, ist die klima-unabhängige Bioenergie aus Biomasse, die zum bestehenden regenerativen Energiemix hinzugeschaltet wurde[4]. Biomasse umfasst die gespeicherte Sonnenenergie in Form von Holz, Energiepflanzen und abgestorbenen Reststoffen wie Stroh und Spreu. Sie liefert Strom und Wärme sowie Kraftstoffe, die zur Energieversorgung benötigt werden[5].

1.1 Bioenergiebereitstellung durch Biogas

Aktuell liegt das Hauptaugenmerk der Bioenergiebereitstellung in der Produktion und Umwandlung von Biogas. So wurden in Europa von 2006 bis 2012 2.000 MW[6] elektrische Leistung über Biogas-BHKW-Anlagen installiert und allein 2011 in Deutschland ca. 1.200[7] Biogasanlagen, hiervon 15[7] zur Biomethan-Produktion für die Erdgaseinspeisung, in Betrieb genommen.
Die aktuellen Anwendungsmöglichkeiten von Biogas liegen sowohl im Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und der Gasnetzeinspeisung als auch in der Kraftstoffproduktion und thermischen Umsetzung[8].

Biogasnutzung durch KWK-Lösungen

KWK-Lösungen bieten die Möglichkeit, Biogas in Strom und Wärme umzuwandeln. Der Strom kann ins Netz eingespeist und Prozesswärme ausgekoppelt werden. Hierfür werden Blockheizkraftwerke mit Gas-Otto- oder Zündstrahl-Motoren eingesetzt[8]. Alternativen sind Mikrogasturbinen, Stirling-Motoren oder Brennstoffzellen. [8] Im Allgemeinen dienen die KWK-Lösungen der Biogasverstromung mit effizienter Wärmenutzung. So kann diese ins Nahwärmenetz eingespeist oder beispielsweise durch Sorptionsverfahren[8] in Kälte umgewandelt werden.

Biogas als Erdgassubstitut zur Netzeinspeisung

Neben den vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten für Biogas in Form von KWK-Lösungen wird Biogas bspw. in Deutschland in mittlerweile ca. 45[8] Anlagen in Biomethan aufbereitet und ins Erdgasnetz als vollwertiges Erdgas-Substitut eingespeist. Alternativ werden Mikrogasnetze zum Betrieb von ortsnahen BHKW etabliert.

Direkte Biogasnutzung als Treibstoff

Neben Erdgas wird Biogas als Treibstoff bereits in Transportmitteln wie Omnibussen und Lastkraftwagen[8], aber auch im privaten Kraftfahrzeugbereich eingesetzt. Hierfür werden im Rahmen von Aufbereitungsprozessen, ähnlich denen der Gasnetzeinspeisungsvarianten, für die Motoren korrosive Bestandteile wie Schwefelwasserstoff[8] entfernt.

Biogasnutzung als Brennstoff

Die weitere bereits etablierte bzw. viel untersuchte Biogasnutzungsvariante ist die direkte thermische Nutzung als Verbrennungsmedium. Hierbei werden speziell auf die Biogaszusammensetzung (ca. 50%[8] Methan) angepasste Brenner eingesetzt. Bei steigender Anzahl an Biogasanlagen wird Biogas als Alternative z.B. zu Erdgas in Brennern verwendet.

1.2 Wasserstoffproduktion aus Biogas

Der Stand der Technik bei der Nutzung von Biogas ist die Umwandlung der enthaltenen chemischen in thermische und elektrische Energie bzw. die Konditionierung zur Nutzung separater Gasbestandteile wie Methan.
Eine innovative Alternative ist die Umwandlung der in Biogas enthaltenen chemischen Energie. Hierbei kann durch die Nutzung chemischer Umwandlungsprozesse Synthesegas, als Wasserstoff-Kohlenstoffmonoxid-Gemisch, bzw. Wasserstoff aus Biogas gewonnen werden.

Anwendungen von Synthesegas und Wasserstoff

Synthesegas wird u.a. in der chemischen Industrie als Prozessmedium für die Ammoniak- oder Methanolsynthese sowie für das Fischer-Tropsch-Verfahren[9] genutzt, reiner Wasserstoff zudem in Brennstoffzellen- und Mobilitätsanwendungen[10]. Durch die H_2-mobility-Initiative wird die Infrastruktur zur Versorgung von bis zu 1,8 Mio. [11] wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen mit einer 100%-igen[11] Versorgungssicherheit bis 2030 ermöglicht werden.

Biogasumwandlung in Wasserstoff

Die Produktion von Wasserstoff aus Biogas ist die Alternative zur Erzeugung durch Elektrolyse und bietet aufgrund der Verfügbarkeit einzelner Anlagen als auch von Anlagenverbünden bzw. -parks dezentrale und zentrale Versorgungsmöglichkeiten.
Zudem ist der vielfältige Einsatz von Wasserstoff als Energiespeicher und Kraftstoff Hauptanknüpfungspunkt zukunftsweisender vernetzter Kraftwerkssysteme, in denen bereits Biogasanlagen integriert sind und die die Grundlage für eine Kopplung vorhandener Technologien ermöglichen[12].
Aufgrund der unterschiedlichen Wege zur Biogasverwertung und Wasserstoffnutzung ist die Entwicklung von Biogasdirektreformern, zur Wasserstoffproduktion, wichtiger Bestandteil zum Aufbau von Wasserstoffinfrastruktur und zur Etablierung vielfältiger Wasserstoff-Nutzungstechnologien. Ursache hierfür ist, dass nur 40%[13] des jährlich weltweit benötigten Wasserstoffs von ca. 500 Mrd. m³[14] aus Industrieprozessen stammt, bei denen Wasserstoff als Nebenprodukt anfällt. Die Reformierung fossiler Kohlenwasserstoffe ist Hauptlieferant für die restlichen 60%[13]. Das wirtschaftlichste Verfahren ist dabei die Dampfreformierung kurzkettiger fossiler Kohlenwasserstoffe (Methan bzw. Erdgas).
Der Vorteil der Wasserstoffproduktion aus Biogas ist die Substitution von fossilen kurzkettigen Kohlenwasserstoffen verbundenen mit Vorteilen bzgl. Versorgungssicherheit, lokaler Wertschöpfung und Kohlenstoffdioxid-Neutralität durch den Einsatz biogener Materialien[13].

2 Prototypkonzepte zur Biogasumwandlung in Wasserstoff

Für die Umsetzung der Biogasaufbereitung zu Wasserstoff als regenerative Quelle der zukunftsorientierten Treibstoffe, Speichermaterialen und Grundchemikalien, werden sowohl für den dezentralen als auch zentralen Anwendungsfall Konzepte für Demonstratoren bzw. Prototypen entwickelt oder kompiliert und im Labor-, Technikums- oder Industriemaßstab umgesetzt.

2.1 Stand der Technik

Der Stand der Technik für die Umwandlung von Biogas in Wasserstoff beruht auf den Erfahrungen aus der Bio-Methan-Produktion und den hierfür nötigen Aufbereitungstechnologien wie Druckwechseladsorption zur Vor- und Nachreinigung sowie der katalytischen Umsetzung.

Abbildung 1: Schematische Darstellung der allgemeinen Gliederung von Aufbereitungstechnologien zur Wasserstoffproduktion aus Biogas

Auf der Grundlage der allgemeinen Prozesskette (Abbildung 1) besteht eine industrielle Wasserstoffproduktion aus Biogas, wie etwa der Terragas®[15]-Prozess (Abbildung 2), aus der Vorreinigung, Reformierung und Nachreinigung.

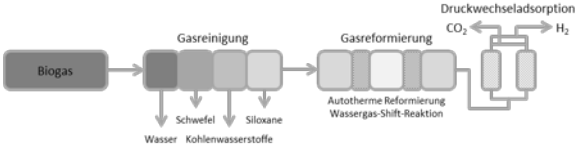


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Terragas®-Prozesses[15] zur Wasserstoffproduktion aus Biogas

Innerhalb der Vorreinigung werden schrittweise Wasser, Schwefelverbindungen, langkettige Kohlenwasserstoffe und Siloxane abgetrennt. Anschließend wird das verbliebene Methan mittels autothermer Festbettreformierung, durch die Kombination von Dampfreformierung und Wassergas-Shift-Reaktion, zu Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid umgewandelt (Tabelle 1).

Dampfreformierung[16-18]	$CH_4 + H_2O \rightleftarrows CO + 3H_2$
Wassergas-Shift-Reaktion[16-18]	$CO + H_2O \rightleftarrows CO_2 + H_2$
$\sum$[15]	$CH_4 + 2H_2O \rightleftarrows CO_2 + 4H_2$

Tabelle 1: Übersicht Reaktionen im Terragas®-Prozess

Durch den Einsatz von Druckwechseladsorption wird der Wasserstoff vom Kohlenstoffdioxid abgetrennt und Wasserstoff-Reinheiten von über 5.0-Qualität erreicht[15].
Alternativ werden integrierte Apparaturen eingesetzt, die die Aufbereitung und Umsetzung des Biogases kombinieren.
Wird Methan aus Biogas mit Wasserdampf umgesetzt entsteht bei der autothermen Reformierung Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid, das durch die Umsetzung von Calciumoxid zu Calciumcarbonat[19] (Tabelle 2) absorbiert wird.

Sorption[20]	$CaO + CO_2 \rightleftarrows CaCO_3$

Tabelle 2: Absorptionsgleichung von Calciumcarbonat

Technisch wird Biogas durch den Absorption-Enhanced-Steam-Methan-Reformer geleitet und das produzierte wasserstoffreiche Gas in einer Druckwechseladsorption aufgereinigt[19].

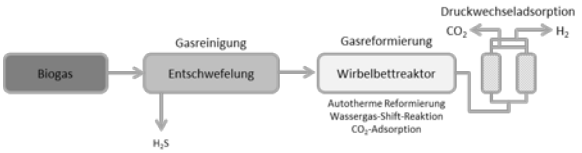


Abbildung 3: Allgemeine Prozesskette der Wasserstoffproduktion aus Biogas mittels Absorption-Enhanced-Steam-Methan-Reformer[19]

Aktueller Stand der Technik bei der Wasserstoffproduktion aus Biogas ist die Kombination von Druckwechseladsorption zur Vorreinigung, autothermem Reformierungs-

reaktor, in dem Dampfreformierung und Wasser-Gas-Shift-Reaktion zusammengeführt werden und Druckwechseladsorption zur Nachreinigung.
Nachteil der Konzeption ist der begrenzte Anwendungsbereich durch hohe Investitionskosten der einzelnen Apparaturen und die Entsorgungskosten für die Abfallprodukte aus der Gasreinigung. Aus der Abtrennung von Wasser und Kohlenstoffdioxid vor der Reformierung, resultiert zudem eine geringe Effektivität, da beide als Reformiermittel genutzt werden können und folglich Wasser durch separate Verdampfung im Anschluss erneut hinzugeführt wird.

2.2 Stand der Forschung

Für die Anwendung im dezentralen/kleinen Leistungsbereich sind Lösungen für die Umwandlung von Biogas in Wasserstoff mit geringerem apparativem Aufwand notwendig. Durch die Beschränkung der Vorreinigung der Biogasaufbereitung im Wasserstoffproduktionsprozess, das Zurückgreifen auf alternative Reaktionssysteme und die Einschränkung der Gasnachbereitung werden Vereinfachungen und Vergünstigungen ermöglicht.

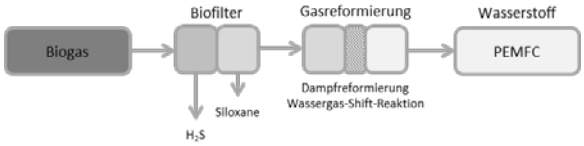


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Bio-Hydrogen-Prozesses[21] zur Wasserstoffproduktion aus Biogas

Das Bio-Hydrogen-System besteht aus einem Biofilter der Profactor GmbH sowie einem Reformer der ZBT GmbH mit kommerziellem Nickel-Katalysator und dient der Speisung einer PEMFC im Labor- oder Technikumsmaßstab. Das System beruht auf der Dampfreformierung, beschränkt sich aber auf die nötigsten Verfahrensschritte zur Wasserstoffproduktion. Die maximale Wasserstoffreinheit lag unter 5.0-Qualität bei einem Gemisch aus Wasserstoff, Stickstoff und Kohlenstoffdioxid.[21]

Die Begrenzung der Vorreinigung auf eine Entschwefelung und Siloxanabscheidung zum Schutz kommerzieller Katalysatoren erhöht den Inertanteil im Restgas durch das nicht abgetrennte Kohlenstoffdioxid und verkleinert das Anwendungsspektrum bzw. senkt die Effektivität von Nutzern wie Brennstoffzellen (z.B. PEMFC). Alternativ können Gasaufbereitung und -umwandlung durch die Nutzung eines Membranreaktors kombiniert werden. Hierbei wird Dampfreformierung in einem Reaktor durchgeführt, der als Wärmemedium eine Molten Nitrate Mixture verwendet und Wasserstoff anschließend parallel über eine selektive Membran abgetrennt. Der Prototyp wird im CoMETHy-Projekt[22] entwickelt, verwirklicht, getestet und optimiert.

2.3 Green-FC-Prototyp-Konzept

Biogas besteht im Allgemeinen hauptsächlich aus Methan, Kohlenstoffdioxid und Anteilen von Schwefelwasserstoff sowie in kleinsten Anteilen (<1 Vol.-%) weitere Komponenten (Tabelle 3). Um Lösungen für die Produktion von Wasserstoff aus Biogas im dezentralen Anwendungsbereich anbieten zu können bzw. Konzepte hierfür zu erstellen, wird im Rahmen des Green-FC-Projektes ein modularer Prototyp (Abbildung 5) für die Umsetzung von Biogas in Wasserstoff für die Speisung einer Hochtemperatur-Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (HTPEMFC) entwickelt, der den Anforderungen der verschiedenen Biogaszusammensetzungen gerecht wird.

Abbildung 5: Schematische Darstellung der Green-FC-Prozesskette

Neben der Möglichkeit Biogas einzusetzen (Modul I: Gaszufuhr), ist die Einspeisung synthetischer Gaskomponenten (z.B. Methan, Kohlenstoffdioxid) und Bioethanols für die Testung der nachfolgenden Apparaturen vorgesehen. Hierdurch wird die Untersuchung alternativer biogener Ausgangsmaterialien ermöglicht.
Die Gaszufuhr (Modul II: Gasreinigung) besteht aus einem einzelnen Filter-Modul basierend auf Aktivkohle zur Abscheidung von Schwefelverbindungen (z.B. Schwefelwasserstoff) und Siloxanen. Modul I kann im Rahmen von Untersuchungen durch Bio-Filter ersetzt oder die Aktivkohle durch Ersatzfilterstoffe ausgetauscht werden.
Die Gasreformierung (Modul III: Gasreformierung) besteht aus einem Reformierungsreaktor zur Umwandlung des Biogases in Wasserstoff über Dampfreformierung an einer Katalysatorschüttung. Im Anschluss folgt ein Shift-Reaktor zur Umsetzung von verbliebenem Kohlenstoffmonoxid. Modul III kann alternativ durch kombinierte Reaktoren ersetzt werden. Eine separate Ausführung von Shift-Reaktor und Reformer wird für die unabhängige Testung von Katalysatoren vorgesehen.

Der in Modul III produzierte Wasserstoff wird innerhalb einer HTPEMFC (Modul IV) verstromt. Diese ist unempfindlich gegenüber Kohlenstoffmonoxid bis 15 Vol.-% im Eintrittsgasgemisch. Die eingesetzte Brennstoffzelle kann

Komponente	CH_4 / [Vol.-%]	CO_2 / [Vol.-%]	H_2S / [ppm]	O_2 / [Vol.-%]	H_2O / [Vol.-%]	N_2 / [Vol.-%]	H_2 / [Vol.-%]
Min. Anteil im Biogas	50	25	20	0	2	0	0
Max. Anteil im Biogas	75	45	20.000	2	7	2	1

Tabelle 3: Übersicht Biogaszusammensetzungsvarianten und Komponentenwirkung[23]

durch alternative Nutzungskonzepte zur Untersuchung ausgetauscht werden. Der Nachbrenner (Modul V: Nachverbrennung) ist für den umweltbedachten Forschungsbetrieb integriert. Hierbei wird das Abgas der Brennstoffzelle aus Modul IV mit zugegebener Luft umgesetzt, um die Emission von Schadgaskomponenten im Versuchsbetrieb zu unterbinden. Der Nachbrenner wird als Kombinationsapparatur mit dem Reformer verknüpft, um ein innovatives Wärmenutzungskonzept zu realisieren.

3 Entwicklung der Komponenten des Green-FC-Prototyps

In Abbildung 6 wird die schematische Darstellung des Prototyps um die Erzeugungswege des Stroms und die Nutzung der Wärme erweitert.

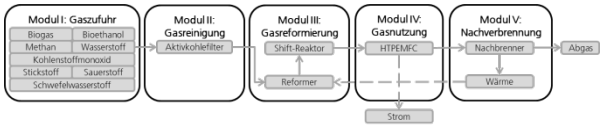


Abbildung 6: Detaillierte schematische Darstellung der Green-FC-Prozesskette mit Wärmenutzung und Stromerzeugung

3.1 Modul I: Gaszufuhr

Neben Biogas und Bioethanol wurden Komponenten ausgewählt, um die Funktion einer Brennstoffzelle zusätzlich direkt mit Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff zu testen bzw. um durch Mischen und Aufbereiten von Modellgasen entsprechend Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff herzustellen.
Zum Einstellen verschiedener Betriebs- und Versuchsparameter sind für die einzelnen Komponenten spezifische Armaturen und Messstellen notwendig. Hierbei handelt es sich um Druckminderer, zur Schaffung des Betriebsdrucks, um Durchflussregler, zur Definierung des Massenstroms und um Absperrarmaturen zur Bauteiltrennung. Zudem werden Rückschlagklappen zur Rückflusssicherung von reaktiven Gasgemischen und Verdampfer zur Wasser- und Bioethanol-Bereitstellung verwendet.

3.2 Modul II: Gasreinigung

Bevor Biogas in den Reformer eingeleitet werden kann, muss Schwefelwasserstoff entfernt werden. Dieser führt zu Korrosion in technischen Apparaten aus Stahl und ist ein Katalysatorgift[23]. Zudem müssen Siloxane entfernt werden, da sie unter Hitzeeinwirkung Siliciumoxid bilden, das zu Materialabrieb und Katalysatordeaktivierung führt[24][32].

Bei der Biogasproduktion kann Schwefelwasserstoff direkt im Fermenter oder in nachgeschalteten Reinigungsapparaten abgeschieden werden. Eine Klassifizierung erfolgt nach chemischen (insitu: Eisensalze, exsitu: Natronlauge, Eisenhydroxid)[23] und biologischen (Bakterien und Sauerstoff)[23] Verfahren. Zudem kann in absorptive (phys.: Wäscher[25], chem.: Ethanolamine und Eisenoxid[26]), adsorptive (phys.: Aktivkohle und Raseneisenerz[27], Calciumverbindungen[29]) sowie trennende (phys.: Molekularsieb[28], Membran[25], SLIM[30]) Verfahren unterschieden werden.

Für die Abscheidung von Siloxanen existieren prinzipiell drei Verfahren: Absorption mit org. Lösungsmitteln, Kondensation bei Temperaturen um oder unter -30 °C und Adsorption an Aktivkohle[31].

Parameter zum Filterbetrieb

Für den Prototyp wird ein Biogasstrom mit 5 kW Methaneintrittsleistung, dies entspricht einem Gesamtvolumenstrom von 1 m³/h i.N., zugrunde gelegt. Für die Entschwefelung wird eine Restkonzentration von max. 1 ppm Schwefelwasserstoff toleriert. Der Gehalt dieses Schadgases liegt im Biogas bei bis zu 150 ppm und partielle Maximalwerte von bis zu 1.500 ppm sind möglich. Es wird apparativ auf ein einfaches und wirtschaftlich stabiles Filterkartuschen-System zurückgegriffen.

Apparatekonzept des Filtersystems

Als Filtermaterial wird mit Kaliumjodid getränkte Aktivkohle verwendet, die sowohl der Entschwefelung als auch der Siloxanabtrennung dient. Sie wird in Pelletform mit einem Durchmesser von 4 mm verwendet und besitzt eine Schüttdichte von ca. 500 kg/m³.
Das Reinigungssystem (Modul I) besteht aus zwei parallel ausgeführten Filterkartuschen. Ein Filter ist stets aktiv, während der andere unbenutzt bleibt. Sinkt die Konzentration auf maximal 1 ppm Schwefelwasserstoff, erfolgt die Weiterleitung über Sicherheitsfilter in die Reformerzuführung (Modul II).

Während des Betriebes wird eine Kartusche dauerhaft durchströmt, bis die integrierten Sensoren einen Anstieg der Schwefelwasserstoffkonzentration auf max. 1 ppm feststellen. Dann wird die Kartusche umfahren und das Biogas in die zweite Kartusche geleitet, bis Kartusche 1 ausgetauscht wurde. Im Anschluss wird wieder Kartusche 1 als Adsorber verwendet. Aufgrund dessen hat Kartusche 2 eine längere Standzeit und wird nur im Rahmen von Reparatur- oder Wartungsarbeiten ausgetauscht.

Das Doppelkartuschen-System wird zum Zweck des unterbrechungsfreien Betriebs und der einfachen Konstruktion ausgewählt. Die Durchströmung des Aktivkohlebettes wird durch ein laminares Strömungsbild über den gesamten Querschnitt erfolgen.

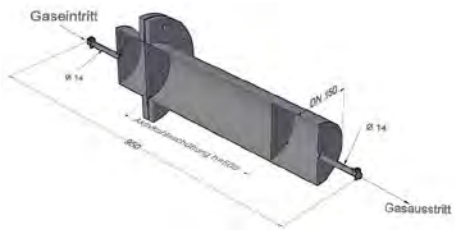


Abbildung 7: Darstellung eines Kartuschen-Filters[46] des Green-FC-Prototyps

Der Filter (Abbildung 7) hat einen Durchmesser von 0,15 m und wird mit einer Schüttung von 0,5 m befüllt. Die Zuleitungen werden in Nennweite DN14 ausgeführt. Hieraus ergibt sich mit den Parametern der Anlage eine Strömungsgeschwindigkeit von ca. 0,02 m//s aus der eine laminare Strömung resultiert und bei der sich eine klare dünne Adsorptionszone ausbildet. Insgesamt können ca. 2 kg Aktivkohle in den Filter gefüllt werden, die mit einem maximalen Schwefelwasserstoffstrom von 0,001 kg/h beaufschlagt werden, sodass bei einer maximalen Aufnahme von 0,06 kg Schwefelwasserstoff eine Betriebszeit von ca. 55 h bei maximaler Gasbelastung mit Schwefelwasserstoff, resultiert, bevor ein Austausch nötig ist. Es resultiert ein maximaler Druckverlust von ca. 13,5 Pa, der hauptsächlich aus dem Siebboden resultiert und eine Homogenisierung der Eintrittsströmung über dem Aktivkohlebett erzeugt. Zum Austausch der Aktivkohle sind die Verbindung des Zuführungsrohres (DN14) und die Flanschschraubverbindung zu lösen, der Flanschdeckel abzunehmen und die Teilchen abzusaugen. Für den Filter gibt es keine besondere Anforderung an den Stahl, es werden lediglich aufgrund der korrosiven Bestandteile von Biogas NIRO-Werkstoffe verbaut.

3.3 Modul III: Gasreformierung

Innerhalb der Gasreformierung wird das in Modul I bereitgestellte und in Modul II aufbereitete Biogas in Wasserstoff umgewandelt.

Reaktionssystem der Biogasreformierung

Für die Umsetzung von Biogas werden Dampfreformierung und partielle Oxidation von Methan eingesetzt. Die Kombination beider Reaktionen bildet eine autotherme Reformierung[33]. Die Methanreformierung ist stark endotherm und bildet Wasserstoff unter Volumenzunahme, deshalb sind nach Le Chatelier Temperaturniveaus von ca. 750 °C und ein geringer Druck notwendig. Zusätzlich werden durch die überstöchiometrische Zugabe von Wasserdampf der Umsatz an Methan und die Wasserstoff-Ausbeute erhöht. Die partielle Oxidation ist eine exotherme unvollständige Verbrennung. Das Gleichgewicht stellt sich bei 1350-1500 °C am schnellsten ein, der Einsatz von Katalysatoren ermöglicht dies bereits bei ca. 900 °C. Aufgrund der Anwesenheit von Kohlenstoffmonoxid, Sauerstoff und Methan kann es durch die Boudouard-Reaktion und Methanzersetzung zur Bildung von Kohlenstoffablagerungen kommen, die die Leistungsfähigkeit von Katalysatoren vermindert. Um dies zu verhindern, ist eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Reaktionsraum zu gewährleisten. Bei partieller Oxidation wird Sauerstoff unterstöchiometrisch zugeführt. Das Sauerstoff/Kohlenstoff-Verhältnis sollte im Betrieb zwischen 0,5 und 0,6 liegen. Eine geringere Sauerstoffzufuhr fördert die Kohlenstoff-Bildung. Zuviel Sauerstoff verbrennt zusätzlich bereits entstandenen Wasserstoff[33].
Die partielle Oxidation stellt die notwendige thermische Energie für die endotherme Methanreformierung durch die Kombination zur autothermen Reformierung zur Verfügung. Es ist möglich, diesen Reformierungstyp in zwei nacheinander geschalteten Reaktionszonen oder in nur einem Reaktor technisch zu realisieren. Der Reaktor kann dabei zunächst durch die Oxidation vorgeheizt werden, bevor zusätzlich Wasserdampf eingespeist wird. Das minimale Dampf/Kohlenstoff-Verhältnis um die Rußbildung zu verhindern, liegt bei atmosphärischem Druck und Temperaturen zwischen 700 und 800°C bei ca. 1,1-1,2[33].

Katalysatoren für die Biogasreformierung

Die größte industrielle Bedeutung bei der Herstellung von Synthesegas hat die heterogen katalysierte Dampfreformierung von Kohlenwasserstoffen[09] auf nickel-basierten Katalysatoren.[36] Üblicherweise eingesetzte Katalysatoren sind Nickeldotierungen auf Aluminiumoxid[37-38,40-41], Siliciumoxid[37], Calciumoxid[39-41], Magnesiumoxid[39-40] und Titanoxid[41] sowie Zeolithen[37]. Typischerweise werden alternativ Edelmetall-Katalysatoren eingesetzt, die eine prinzipiell hohe Aktivität aufweisen, aufgrund ihrer Herkunft aber als wirtschaftlich problematisch gelten[34].
Im Green-FC-Reformer werden nickelbasierte Standardkatalysatoren auf Aluminiumoxidbasis eingesetzt.

Parameter zum Reformerbetrieb

Für den Reformer gibt es die Vorgaben der Wasserstoffmaximierung, der Kohlenstoffmonoxidminimierung und der Verhinderung von Kohlenstoffbildung.

Apparatekonzept des Biogasreformers

Für den Reformer wird ein Nickelkatalysator auf Aluminiumoxid verwendet. Die Bio- bzw. Brenngaszufuhr erfolgt von oben, so wird eine Fluidisierung des Bettmaterials verhindert. Zum Einsatz kommen hitzebeständige NIRO-Werkstoffe (z.B. 1.4828 od. 1.4841) und hitzebeständige Dichtungen wie z.B. ISOPLAN 900 und ISOPLAN 1100.
Der Reaktor wird entsprechend isoliert. Der Betrieb erfolgt bei Umgebungsdruck. Es sind drei Temperaturmessstellen – am Eintritt, am Austritt und in der Mitte des aktiven

Bereiches – eingebaut. Konstruktiv wird dies durch seitliche Zuführung der Messfühler realisiert. Die Bettmaterialien werden im Reaktor durch Siebböden gehalten, deren Lochdurchmesser maximal 3 mm beträgt, da auf Partikelgrößen von mindestens 4 mm zurückgegriffen wird. Im Anlagenstillstand ist der Austausch der Katalysatoren durch Lösen der Zuleitungen und Flanschschraubverbindungen sowie Abnehmen des Flanschdeckels vorgesehen. Der Reformer wird bei 800 °C betrieben und es werden Luft, vorgereinigtes Biogas und Wasserdampf hinzugegeben, sodass ein Reformat-Volumenstrom von bis zu 15m³/h entsteht.

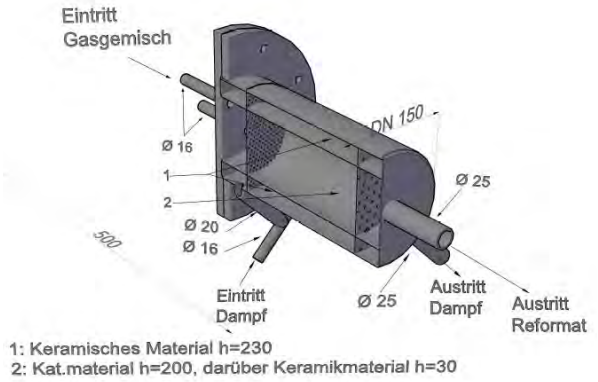


Abbildung 8: Darstellung der Reformer-Nachbrenner-Kombi-Kompaktapparatur[46] des Green-FC-Prototyps

Der Reformer wird über Leitungen mit der Nennweite DN16 mit Biogas, Luft und Wasserdampf beschickt, das Reformat wird über DN25-Leitungen abgeführt. Der Reaktor hat einen Durchmesser von 0,15 m und eine Höhe von 0,5 m. Er wird mit ca. 0,03 m Keramikmaterial auf dem obersten Siebboden zur Homogenisierung der Gasströme befüllt. In der mit 0,2 m hoher Katalysatorschüttung gefüllten Reaktionskammer unmittelbar unterhalb des Siebbodens können die chemischen Reaktionen ablaufen. Es resultiert in der Konfiguration ein Gesamtdruckverlust von ca. 70 Pa.

Reaktionssystem im Shift-Reaktor

Um nach der Reformierung bei gleichzeitiger Senkung des Kohlenstoffmonoxid-Anteils den Wasserstoff-Gehalt zu erhöhen, damit das Reformatgas in der HTPEMFC genutzt werden kann, wird dem Reformer eine Wassergas-Shift-Stufe nachgeschaltet. Großtechnisch werden üblicherweise eine Hochtemperatur- und eine Niedertemperatur-Stufe angefügt. Die Hochtemperatur-Stufe sorgt dafür, dass die Konzentration an Kohlenstoffmonoxid von 10-13% im Gasgemisch, das aus dem Reformer austritt, auf 2-3% abgesenkt wird, wohingegen die Niedertemperatur-Stufe die Minderung auf unter 10 ppm vollzieht.[33] Man unterscheidet demzufolge die Hochtemperatur- (350-400°C) und Niedertemperatur-Konvertierung (200-250°C), wobei im oberen Temperaturbereich keine vollständige Kohlenstoffmonoxid-Entfernung möglich ist, da das chemische Gleichgewicht nur unvollständig auf der Produktseite liegt. Je geringer die Temperatur, desto mehr verschiebt sich das Gleichgewicht der Wassergas-Shift-Reaktion in Richtung Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid. Nebenreaktion ist die selektive Oxidation von Kohlenstoffmonoxid mit Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid. Nachteilig dabei ist, dass gleichzeitig Wasserstoff zu Wasserdampf oxidiert wird. Eine Unterdrückung ist durch die Anpassung der Sauerstoff- bzw. Luftzufuhr und geeignete Katalysatoren möglich.[33]

Katalysatoren für den Shift-Reaktor

Die Wassergas-Shift-Reaktion verläuft exotherm. Um einen hohen Gleichgewichtsumsatz zu erreichen, sollte die Reaktionstemperatur niedrig gehalten werden. Die Temperatur unter 200°C zu senken ist allerdings nicht praktikabel, da die katalytische Aktivität stark abnimmt und sich die Reaktionsgeschwindigkeiten minimieren. Der bevorzugte Katalysator ist kostengünstiges und sinterresistentes Eisenoxid. Chromoxid wird zusätzlich als Stabilisator eingesetzt und minimiert das Sintern der aktiven Eisenionen. Zudem adsorbiert es zurückgebliebene Spuren von schwefel- und chlorhaltigen Verbindungen im Gas. Zusätzlich können Kombinationen aus Kupfer, Zink, Aluminium oder Kupferoxid und Edelmetalle wie Gold und Platin als Katalysator eingesetzt werden. Als Trägermaterialien können Titanoxid, Eisenoxid oder Ceriumoxid verwendet werden.[34]

Parameter des Wassergas-Shift-Reaktors

Ziel ist die Minimierung der Kohlenstoffmonoxidkonzentration auf maximal 3 Vol.% im Gasgemisch vor Eintritt in die HTPEMFC.

Apparatekonzept des Wassergas-Shift-Reaktors

Die Reformatgaszufuhr erfolgt von oben, sodass eine mögliche Fluidisierung des Bettmaterials vermieden wird. Zum Austausch des Katalysators sind die Verbindungen der Zuführungsrohre und die Flanschschraubverbindung zu lösen sowie der Flanschdeckel abzunehmen.
Der Wassergas-Shift-Reaktor wird bei Temperaturen von ca. 400°C unter Normaldruck betrieben. Er besteht aus austenitischen, rostfreien Stählen der V2A-Reihe oder V4A-Reihe. Novaform SK der Fa. Frenzelit kommt als Dichtung zum Einsatz. Das Material ist für Temperaturen von ca. 400°C bei bis zu 3,0 bar Betriebsdruck geeignet. Als Katalysator wird Eisenoxid in Kombination mit Chromoxid eingesetzt.

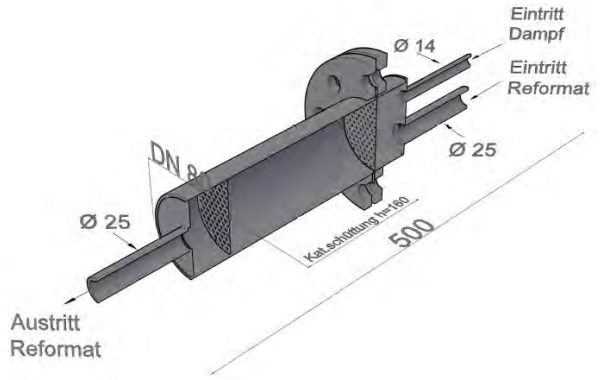


Abbildung 9: Darstellung des Wassergas-Shift-Reaktors[46] *des Green-FC-Prototyps*

Für die Temperaturmessung sind drei seitlich zugeführte Messstellen integriert, am Ein- und Austritt sowie in der Mitte der Schüttung. Das Bettmaterial wird durch einen Siebboden gehalten, dessen Lochdurchmesser maximal 3 mm beträgt, da auf Partikelgrößen von mindestens 4 mm zurückgegriffen wird. Es resultiert ein Druckverlust von ca. 112 Pa. In Abbildung 9 wird der konstruktive Entwurf des Reaktors dargestellt.

3.4 Modul IV: Gasnutzung

Die HTPEMFC, die im Prototyp zum Einsatz kommt, basiert auf Polybenzimidazol-(PBI)-Membranen. Diese sind mit Phosphorsäure dotiert und garantieren eine ausreichend hohe Leitfähigkeit, sodass eine zusätzliche Befeuchtung entfällt. Dieser Brennstoffzellentyp wird bei Temperaturen zwischen 120 und 180°C betrieben[35].

	NT-PEM-FC	HT-PEM-FC
Membran/Elektrolyt	Nafion/H2O	PBI/H3PO4
Betriebstemperatur	0-90°C	120-180°C
Befeuchtung ?	ja	nein
Katalysator	Platin	Platin
CO – Toleranz	bis 20 ppm	bis 3%

Tabelle 4: Übersicht Brennstoffzelleneigenschaften [35,42]

Bei diesen Temperaturen ist die Anfälligkeit der HTPEMFC gegenüber Kohlenstoffmonoxid-Vergiftung geringer als bei NTPEMFC[42]. Bei der Vergiftung wird Kohlenstoffmonoxid an der Katalysatoroberfläche adsorbiert und freie Plätze für die Reaktion von Wasserstoff als Vorstufe der Dissoziation, Diffusion und Abreaktion mit Sauerstoff blockiert. In Tabelle 4 sind die Eigenschaften von NTPEMFC und HTPEMFC im Vergleich nebeneinander dargestellt. Alternativ kann das Modul durch separate Nutzungswege ersetzt werden.

3.5 Modul V: Nachverbrennung

Die Nachverbrennung dient der Abgasreinigung – also der Beseitigung von oxidierbaren Bestandteilen. Häufig verwendete Verfahren sind die katalytische und die thermische Nachverbrennung. Bei Temperaturen von 200-600°C ist die Durchführung der katalytischen Nachverbrennung möglich, wobei es sich um eine flammenlose Verbrennung an der Katalysatoroberfläche handelt. Die thermische Nachverbrennung arbeitet bei Temperaturen von 600-1200°C und benötigt eine Zündquelle, um die Reaktionen zu starten. Damit die Temperatur im Nachbrenner konstant gehalten werden kann, wird meist ein zusätzlicher Brennstoff eingeleitet. Im Rahmen des Green-FC-Prototyps wird eine thermische Nachverbrennung eingesetzt.

Parameter der Nachverbrennung

Das durch die thermische Nachverbrennung erzeugte Abgas soll keine brennbaren Komponenten enthalten.

Apparatekonzept der Nachverbrennung

Innerhalb des eingesetzten Nachbrenners wird das Abgas der HTPEMFC mit Luft versetzt. Hierbei reagieren die verbliebenen Anteile an Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff mit Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid und Wasser. Es handelt sich hierbei um exotherme Verbrennungsreaktionen. Ziel des Nachverbrenners ist die Abgasreinigung und Beheizung des Reformers. Der Nachbrenner umschließt deshalb den Reformer und stellt diesem, durch die Verwertung von nicht umgesetztem Brenngas aus der HTPEMFC, Wärmeenergie bereit. Hierbei handelt es sich um einen innovativen Kombi-Kompakt-Reformer. Innerhalb des Nachbrenners wird eine keramische Schüttung bzw. eine keramische Wabenstruktur eingesetzt, um die Gasströme zu homogenisieren, Oberfläche für die Reaktionen bereitzustellen und ein homogenisiertes Wärmefeld zur verbesserten Wärmeleitung in den Reformer zu erzeugen. Die Nachverbrennung ist isoliert um Wärmeverluste zu minimieren und mit drei Temperaturmessstellen bestückt – am Eintritt, am Austritt und in der Mitte des aktiven Bereiches. Konstruktiv ist dies durch seitliche Zuführung der Messfühler realisiert. Um die Bettmaterialien im Reaktor zu halten, sind Siebböden deren Lochdurchmesser maximal 3 mm betragen, da auf Partikelgrößen von mindestens 4 mm zurückgegriffen wird, eingebaut.

Die beiden Reaktionsräume sind so voneinander abgedichtet, dass kein Reformat in den Nachbrenner und kein Brenngas in den Reformer gelangt. Die konstruktive Umsetzung wird durch die Schaffung einer Dichtungsnut zur Aufnahme von Nut und Feder realisiert. Die Konstruktion ist in Abbildung 8 dargestellt.

In dem tangential angeordneten Zuführungsrohr (DN20) vermischen sich die Reaktionsgase für die Nachverbrennung (T-Stück DN16). Dadurch beginnt die Nachverbrennung unmittelbar nach Eintritt der Gase. Im Nachbrenner

befindet sich eine 0,23 m hohe Schüttung aus keramischem Material, die durch einen Siebboden gehalten wird. Es resultiert ein Druckverlust über dem Nachbrenner von ca. 50 Pa. Der Nachbrenner wird bei Umgebungsdruck betrieben und es stellen sich Temperaturen bis 1000 °C ein.

3.6 Wärmekonzept des Green-FC-Prototyps

Im Rahmen des Prototyps werden die Aufheizung des Wasserdampfes aus einem Verdampfer von 100 °C auf 800 °C, die Aufheizung von Methan von 20 °C auf 800 °C und die Aufheizung von gereinigtem Biogas bzw. Bioethanol sowie die Aufheizung der Luft von 20 °C auf 800 °C für den Reformer in einem eigens konstruierten elektrischen Heizer realisiert.

Zusätzlich wird das Gemisch aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff für Betriebsweisen mit synthetischem Gas für die Brennstoffzelle von 20 °C auf 180 °C und die Druckluft für den Kathodenraum der Brennstoffzelle von 20 °C auf 180 °C aufgeheizt. Hingegen wird das Reformat das dem Wassergas-Shift-Reaktor entgegenströmt von 800 °C auf 400 °C und das Reformat aus dem Reaktor, das in die Brennstoffzelle fließt von 400 °C auf ca. 180 °C im Wärmeübertrager mittels Wasser gekühlt.

Zudem werden die Abgase des Nachbrenners von 815 °C auf 150 °C und die Abgase aus den Wärmeüberträgern gemeinsam mit der Luft aus der Brennstoffzelle in Kondensatoren abgekühlt.

In den Elektroheizern und Wärmeübertragern werden Temperaturen bis zu 800°C erreicht. Sie sind aus hitzebeständigem NIRO-Werkstoff. Als Dichtungen sind ISOPLAN 900 und ISOPLAN 1100 verbaut.

3.7 Abgasbehandlung des Green-FC-Prototyps

Das Abgas des Prototyps wird über einen Ventilator bzw. Saugzug an die Umwelt abgegeben. Mittels der Apparaturen können demnach sowohl das Druckniveau in den Reaktoren, hauptsächlich bestimmt durch die eingebrachten Schüttungen, als auch die Verdünnung und Abfuhr der Produktgase an die Umwelt geregelt werden. Die Kühler im Prototyp übertragen zudem die überschüssige Wärme des Systems und senken die Abgasablasstemperatur auf ca. 20 °C, um eine unnötige Erwärmung der Umgebung, zu verhindern.

3.8 MSR-Konzept des Green-FC-Prototyps

Der Prototyp wird über Siemens-SPS-Steuertechnik und Siemens-S7-Steuerung betrieben. Hierfür gibt es eine genaue Aufschlüsselung aller Messstellen (Temperatur, Druck, Durchfluss etc.), eine Liste aller Regeleinrichtungen (Ventile, Klappen, Mass-Flow-Controller etc.) und eine Planung, wie die Anlage bei der Inbetriebnahme, dem Versuchsbetrieb und im Sicherheitsfall (Kohlenstoffmonoxid-Warner, Wasserstoff-Warner etc.) reagieren muss.

4 Simulation des Green-FC-Prototyps

Im Rahmen der Strömungssimulationen wurden Vorhersagen über die Verläufe von Geschwindigkeits-, Konzentrations-, Temperatur- und Wärmeprofil getroffen. Des Weiteren dient diese Methodik der Optimierung von Apparaten vor der Realisierung.

4.1 Simulation der Reformer-Nachbrenner-Kombination

Im Rahmen der Simulation der innovativen Reaktorkombination mit der CFD-Software Fluent wird für den Reformer die Methanoxidation im gesamten Reaktor und die Methanreformierung in der Katalysatorschüttung sowie für den Nachbrenner die Verbrennung von Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid angenommen. Für die Simulation der chemischen Reaktionen wurden zwei Modelle untersucht, das Eddy-Dissipiationsmodell und Reaktionsraten in Form von Arrhenius-Ansätzen. Ersteres ist für schnelle Reaktionen geeignet, bei denen die Reaktionsgeschwindigkeit nur durch die turbulente Vermischung begrenzt wird. Daher werden keine Reaktionskinetiken verwendet.

In einer ersten Simulation wurde das Eddy-Dissipations-Modell in Reformer und Nachbrenner verwendet. Die Parameter und Ergebnisse der Simulation sind in Tabelle 5 und Tabelle 6 angegeben. Es wurde festgestellt, dass mit dem Eddy-Dissipations-Modell die Reaktionen im Reformer zu schnell ablaufen. Die Reaktion ist bereits nach wenigen Millimetern Katalysatorschicht abgeschlossen. Eine derartig schnelle Reaktion erscheint unrealistisch, offenbar ist hier das eher für Verbrennungsreaktionen entwickelte Eddy-Dissipations-Modell ungeeignet. In Abbildung 10 ist der Methananteil im Reformer und die sofortige Abreaktion dargestellt.

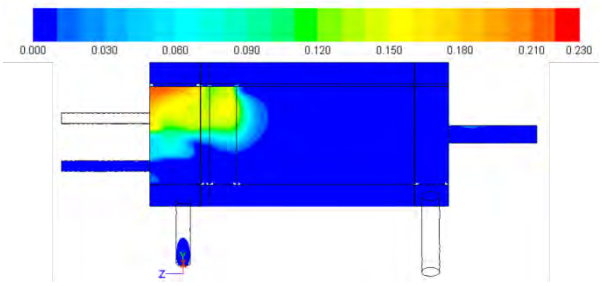


Abbildung 10: Darstellung des Methananteils[46] im Reformer des Green-FC-Prototyps

Simulierte Region	Reformer und Nachbrenner		
Reaktion	Oxidation (gesamter Reformer)		
	Reformierung (im Reformer am Katalysatorschicht)		
	Oxidation (Nachbrenner)		
Reaktionsgeschw.	Eddy-Dissipations-Modell		
Wärmetransport	Wärmeleitung durch die Wand		
Strahlung	Modell der diskreten Ordinaten		
Turbulenzmodell	$k\omega$-SST		
stationär/instationär	Stationär		
Eintritt Reformer Biogas	Temperatur		800 °C
	Volumenanteile	CH_4	50,0 Vol.-%
		CO_2	50,0 Vol.-%
Eintritt Reformer Wasserdampf	Temperatur		800 °C
	Volumenanteil	H_2O	100,0 Vol.-%
Eintritt Reformer Luft	Temperatur		800 °C
	Volumenanteile	O_2	21,0 Vol.-%
		N_2	79,0 Vol.-%
Eintritt Nachbrenner	Temperatur		109 °C
	Volumenanteile	CO	1,250 Vol.-%
		CO_2	27,693 Vol.-%
		H_2	10,722 Vol.-%
		O_2	7,187 Vol.-%
		N_2	53,149 Vol.-%

Tabelle 5: Parameter für die Simulation der Reformer-Nachbrenner-Kombination mit Eddy-Dissipiationsmodell

In einer zweiten Simulation wurden im Reformer Reaktionsraten nach De Smet et al.[43] für die Methanoxidation und Numaguchi & Kikuchi[44] für die Methanreformierung verwendet. Die Parameter und Ergebnisse der Simulation sind in Tabelle 7 und Tabelle 8 angegeben. Im Ergebnis liefen die Reaktionen im Reformer wesentlich langsamer und verteilten sich gleichmäßig auf die Katalysatorschicht. Die Modellierung mit Reaktionsraten im Reformer erscheint daher realistischere Ergebnisse zu erzielen.

Austritt Reformer			
		Simulation	Vollumsatz (CH_4/O_2)
Volumenanteile	CH_4	0,30 Vol.-%	0,00 Vol.-%
	H_2O	27,39 Vol.-%	27,70 Vol.-%
	CO	8,94 Vol.-%	9,02 Vol.-%
	CO_2	14,58 Vol.-%	14,75 Vol.-%
	H_2	26,82 Vol.-%	27,05 Vol.-%
	O_2	0,41 Vol.-%	0,00 Vol.-%
	N_2	21,56 Vol.-%	21,48 Vol.-%
Austritt Nachverbrenner			
		Simulation	Vollumsatz (CH_4/O_2)
Volumenanteile	CH_4	0,00 Vol.-%	0,00 Vol.-%
	H_2O	11,40 Vol.-%	11,40 Vol.-%
	CO	0,00 Vol.-%	0,00 Vol.-%
	CO_2	30,79 Vol.-%	30,79 Vol.-%
	H_2	0,00 Vol.-%	0,00 Vol.-%
	O_2	1,28 Vol.-%	1,28 Vol.-%
	N_2	56,53 Vol.-%	56,53 Vol.-%

Tabelle 6: Ergebnisse für die Simulation der Reformer-Nachbrenner-Kombination mit Eddy-Dissipiationsmodell

Simulierte Region	Reformer und Nachbrenner		
stattfindende Reaktion	Oxidation (gesamter Reformer)		
	Reformierung (im Reformer am Katalysatorschicht)		
	Oxidation (Nachbrenner)		
Reaktionsgeschw.	De Smet et al. / Numaguchi & Kikuchi		
Wärmetransport	Wärmeleitung durch die Wand		
Strahlung	Modell der diskreten Ordinaten		
Turbulenzmodell	$k\omega$-SST		
stationär/instationär	Instationär (bessere Konvergenz)		
Eintritt Reformer Biogas	Temperatur		800°C
	Volumenanteile	CH_4	50,0 Vol.-%
		CO_2	50,0 Vol.-%
Eintritt Reformer Wasserdampf	Temperatur		800°C
	Volumenanteil	H_2O	100,0 Vol.-%
Eintritt Reformer Luft	Temperatur		800°C
	Volumenanteile	O_2	21,0 Vol.-%
		N_2	79,0 Vol.-%
Eintritt Nachbrenner	Temperatur		935°C
	Volumenanteile	CO_2	30,800 Vol.-%
		H_2O	11,400 Vol.-%
		O_2	1,300 Vol.-%
		N_2	56,500 Vol.-%

Tabelle 7: Parameter für die Simulation der Reformer-Nachbrenner-Kombination mit Reaktionsraten

Austritt Reformer			
		Simulation	Vollumsatz (CH_4/O_2)
Volumenanteile	CH_4	0,50 Vol.-%	0,00 Vol.-%
	H_2O	25,40 Vol.-%	29,00 Vol.-%
	CO	11,90 Vol.-%	10,70 Vol.-%
	CO_2	10,09 Vol.-%	13,10 Vol.-%
	H_2	27,30 Vol.-%	25,60 Vol.-%
	O_2	2,90 Vol.-%	0,00 Vol.-%
	N_2	21,10 Vol.-%	21,50 Vol.-%
Austritt Nachbrenner			
		Simulation	
Volumenanteile	CH_4	0,00 Vol.-%	
	H_2O	11,40 Vol.-%	
	CO	0,00 Vol.-%	
	CO_2	30,80 Vol.-%	
	H_2	0,00 Vol.-%	
	O_2	1,30 Vol.-%	
	N_2	56,60 Vol.-%	

Tabelle 8: Ergebnisse für die Simulation der Reformer-Nachbrenner-Kombination mit Reaktionsraten

Im Nachbrenner ergab eine Modellierung der Oxidationen durch Reaktionsraten jedoch eine sehr langsame und unvollständige Verbrennung. Hier erwies sich das für schnelle Reaktionen entwickelte Eddy-Dissipations-Modell als geeigneter. Wünschenswert wäre daher eine Kombination der Verfahren: Reaktionsraten im Reformer und Eddy-Dissipation im Nachbrenner. Eine solche Kombination wurde jedoch von der Software Fluent nicht unterstützt. Daher wurde in der zweiten Simulation vereinfacht eine sofortige Reaktion im Nachbrenner angenommen und die Eintrittsbedingungen entsprechend gesetzt. Daher erscheinen in Tabelle 8 nur die Reaktionsprodukte im Nachbrenner-Eintritt und die Temperatur entspricht der einer vollständigen Verbrennung.
Die Darstellung des statischen Temperaturfeldes der Reformer-Nachbrenner-Kombination (Abbildung 11) verdeutlicht durch die gleichmäßige Ausbildung, dass die Übertragung der Wärme aus der Verbrennung in die Reformierung realisiert wurde.

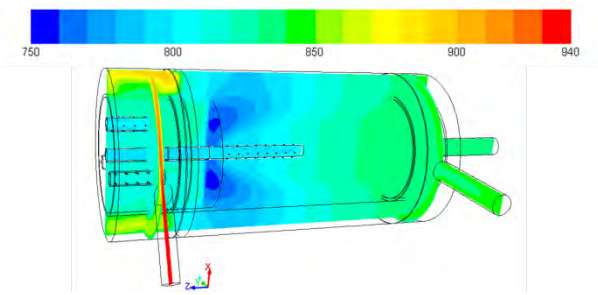


Abbildung 11: Darstellung der statischen Temperatur in der Reformer-Nachbrenner-Kombination[46] des Green-FC-Prototyps

4.2 Simulation des Wassergas-Shift-Reaktors

Im Rahmen der Simulation des Shift-Reaktors mit der CFD-Software Fluent werden für die im gesamten Reaktor ablaufende Wassergas-Shift-Reaktion Reaktionsraten nach Hla et. al.[45] verwendet. Alle Parameter für die Simulation sind in (Tabelle 9) dargestellt.

Simulierte Region	Wassergas-Shift-Reaktor		
stattfindende Reaktion	Wassergas-Shift-Reaktion (Reaktor+ Schüttung)		
Reaktionsgeschw.	Hla et. al.		
Turbulenzmodell	$k\omega$-SST		
stationär/instationär	stationär		
Eintritt Reaktor	Temperatur		400°C
	Volumenanteile	H_2O	29,0 Vol.-%
		CO	10,7 Vol.-%
		CO_2	13,1 Vol.-%
		H_2	25,6 Vol.-%
		O_2	0,1 Vol.-%
		N_2	0,215 Vol.-%

Tabelle 9: Parameter für die Simulation des Wassergas-Shift-Reaktors mit Reaktionsraten

Die Simulation ergab, dass der Wassergas-Shift Reaktor den Kohlenstoffmonoxidanteil im Gasgemisch soweit reduzieren kann (Siehe Tabelle 10), dass er unter den kritischen Punkt von 3 Vol.-% fällt, der für die Beeinflussung der Funktionalität der HTPEMFCs durch Kohlenstoffmonoxid-Vergiftung, entscheidend ist.

Austritt Shift-Reaktor			
		GGW	Simulation
Volumenanteile	H_2O	22,55 Vol.-%	20,00 Vol.-%
	CO	4,25 Vol.-%	2,50 Vol.-%
	CO_2	19,55 Vol.-%	22,50 Vol.-%
	H_2	32,05 Vol.-%	33,50 Vol.-%

Tabelle 10: Ergebnisse für die Simulation des Wassergas-Shift-Reaktors mit Reaktionsraten

5 Fazit und Ausblick

Im Rahmen des Projektes wurde ein Prototypkonzept zur Untersuchung von dezentralen Lösungsansätzen zur Produktion von Wasserstoff aus Biogas erstellt. Als Ergebnis liegt die Auslegung für die gesamte Anlage mit Simulation des Shift-Reaktors und der innovativen Reformer-Nachbrenner-Kombinationsapparatur vor. Hierbei wurde nachgewiesen, dass der Betrieb einer HTPEMFC mittels Biogas durch die Reinigung mit Aktivkohledoppelkartuschenfiltern, die Umwandlung in einem Reformer sowie die Konditionierung in einem Shift-Reaktor zur Speisung der Brennstoffzelle möglich ist.

Hinsichtlich der dem Stand der Technik entsprechenden Abtrennung von Kohlenstoffdioxid und Wasser in Anlagen zur Umwandlung von Biogas in Wasserstoff, wurde eine Möglichkeit geschaffen, den Wasserstoff ohne Abtrennung zur Stromerzeugung in Brennstoffzellen zu nutzen.

Nach tiefgründiger Untersuchung des Green-FC-Prototyps sollte in Zukunft nicht nur die Abtrennung eingespart werden, sondern das vorhandene Kohlenstoffdioxid als Edukt in der trockenen Reformierung verwendet werden. Eine Anpassung des Green-FC-Prototyps hinsichtlich des veränderten Reaktionssystems ist durch die modulare Bauweise möglich.

6 Danksagung

Auf diesem Wege möchten wir uns für die intensive und lukrative Zusammenarbeit bei dem Projektpartner Dr. Weigel Anlagenbau GmbH und den Mitarbeitern Dipl.-Ing. R. Zettl und Dipl.-Ing. D. Döhling bedanken. Ein besonderer Dank gilt ebenfalls den Mitarbeitern der Prozess- und Anlagentechnik des Fraunhofer Instituts für Fabrikbetrieb und -automatisierung.

7 Literatur

[1] Benedikt 2010 1. Jorns, Benedikt. www.happy-working.ch. [Online] 01.Dezember2010. http://www.happy-working.ch/Energieverbrauch_weltweit.pdf.
[2] SDZ 2010 2. sueddeutsche. www.sueddeutsche.de. [Online] 23.03.2010. [Stand vom: 01.12 2010.] http://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/atomkraft-fuer-energieproblem-der-welt-gates-tueftelt-an-mini-meilern-1.1199.
[3] EUP 2011 3. Europäisches Parlament. www.energieverbraucher.de. [Online] 18.02 2011. http://www.energieverbraucher.de/files/download/file/0/1/0/13260.pdf.
[4] BMU20104.BMU. www.bmu.de. [Online] 16.07.09. [Stand vom: 1. 12 2010.] http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ausbau_ee_strom.pdf.
[5] AEE 2012 5. Energien, Agentur für Erneuerbare. www.unendlich-viel-energie.de. [Online] http://www.unendlich-viel-energie.de/de/bioenergie/detailansicht/browse/1/article/105/was-ist-bioenergie.html. 10.05.2012
[6] trend:research GmbH, Institut für Trend- und Marktforschung, Bremen, Studie: Markt für Biogasanlagen in Europa bis 2020
[7] Fachverband Biogas e.V., http://www.biogas.org, Biogas Segments Statistics 2011
[8] FNR, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Leitfaden Biogas: Von der Gewinnung zur Nutzung, 5. Auflage, Gülzow 2010

[9] Baerns 2006 Baerns, M.; Behr, A.; Brehm, A.;Gmehling, J.; Hofmann, H.;Onken, U.; Renken, A.: Technische Chemie, WILEY-VCH Verlag, Weinheim, 2006
[10] ISO 14687-2/SAE J2719
[11] "H2 Mobility" - Gemeinsame Initiative führender Industrieunternehmen zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland, Flyer, 2012
[12] NOW GmbH, Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Flyer, 2012
[13] Eichlseder, H.; Klell, M.: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik [Hydrogen in Vehicle Technology]. 3rd Edition, Springer Vieweg, ISBN 978-3-8348-1754-9, 2012
[14] Hydrogeit: Der Wasserstoffguide: http://www.hydrogeit.de/wasserstoff Stand: 2.11.2012
[15] Air Science Terragas, http://www.airscience.ca, Stand 14.05.2012
[16] Wang, S.; Lu, G. Q.; Millar, G. J.: Carbon Dioxide Reforming of Methane To Produce Synthesis Gas over Metal-Supported Catalysts: State of the Art, Energy Fuels, 10,S. 896-904, 1996
[17] Fan, M.-S.; Abdullah, A. Z.; Bhatia, S.: Catalytic Technology for Carbon Dioxide Reforming of Methane to Synthesis Gas, CHEMCATCHEM. 1, S. 192-208, 2009
[18] Rostrup-Nielsen, J.R.: Production of Synthesis gas, Catalysis Today 18, S. 305-324, 1993
[19] Buhaug, Janne, Sustainable hydrogen production: From waste to biogas to hydrogen, Nordic Biogas Conference Malmö, 05.03.2008
[20] Mohamed Hamzeh Mohamed Halabi: Sorption Enhanced Catalytic Reforming of Methane for Pure Hydrogen Production - Experimental and Modeling (Dissertation); 09.05.2011; Technische Universität Eindhoven
[21] Bio-Hydrogen, Development of a Biogas Reformer for Production of Hydrogen for PEM Fuel Cells, Final Activity Report, 20.09.2007
[22] CoMetHy, Compact Multifuel-Energy to hydrogen converter, http://www.fch-ju.eu/project/compact-multifuel-energy-hydrogen-, Stand 14.05.2012
[23] Institut für Energetik und Umwelt gGmbH; Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft; Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V.: Handreichung - Biogasgewinnung und -nutzung. 3. Aufl. Gülzow, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 2006
[24] ATZ Entwicklungszentrum: Grundlegende Untersuchungen zur effektiven, kostengünstigen Entfernung von Schwefelwasserstoff aus Biogas. Ergebnisbericht, ATZ Entwicklungszentrum, 2004
[25] Riewenherm, C.: Abtrennen von Schwefelwasserstoff und Kohlendioxid aus Gasgemischen mit Membrantrennverfahren. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 3 Nr. 580, VDI Verlag, Düsseldorf, 1999
[26] Archiv für Energiewirtschaft: Einzelbericht Nr. 532 - Entfernung von Schwefelwasserstoff aus Generatorgas und aus anderen Industriegasen. Archiv für Energiewirtschaft, Berlin, 1956
[27] Pesta, G.; Ruß, W.: Die zuverlässige Reinigung von Biogas - Verfahren und Lösungsansätze. Fachtagung: Innovationen in der Biogastechnologie. Tagungsband, S. 99-123, Deggendorf, 2004
[28] Groninger, H.-G.: Die adsorptive Entfernung von Schwefelwasserstoff aus einem H2S/CH4- und einem H2S/CO2/CH4- Gemisch unter hohen Drücken als Modellstudie der Erdgasentschwefelung am Molekularsieb 5 A. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1984
[29] Riepe, T.: Abscheidung von Schwefelwasserstoff durch Calciumverbindungen im Temperaturbereich von 600 bis 1000°C. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 3 Nr. 210, VDI Verlag, Düsseldorf, 1990
[30] Glöckner, T.; Kern, C.; Jess, A.; Seeberger, A.: Membranen aus ionischen Flüssigkeiten zur Reinigung von Gasen. P2.17 In: Chemie Ingenieur Technik, 81, Nr. 8, 2009
[31] Pingel, L.: Brennstoffzellennutzung in der Biogastechnik. Eine technische und ökonomische Analyse. Diplomica Verlag GmbH, Hamburg, 2008
[32] Brosowski: Synthese und Charakterisierung oberflächen-modifizierter Kieselgele für die selektive Siloxanentfernung aus methanhaltigen Gasen. Diplomarbeit, Universität Duisburg-Essen, 2009
[33] Gerber, J.: Methodik zur Bewertung modularer Konzepte zur Reformatgasaufbereitung für PEM-Brennstoffzellenanlagen zur dezentralen Energieversorgung. Dissertation, TU Freiberg, 2007
[34] Bartholomew, C. H.; Farrauto, R. J.: Fundamentals of Industrial Catalytic Processes. 2. Aufl., Wiley-Interscience, 2006
[35] Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg Gemeinnützige Stiftung: Offenlegungsschrift DE 10 2007 044 634 A1. Deutsches Patent- und Markenamt, 2009
[36] Wang, S.; Lu, G. Q.; Millar, G. J.: Carbon Dioxide Reforming of Methane To Produce Synthesis Gas over Metal-Supported Catalysts: State of the Art, Energy Fuels, 10,S. 896-904, 1996
[37] Kim, G.J.; Cho, D.S.; Kim, K.H.; Kim, J.H.: The reaction of CO2 with CH4 to synthesize H2 and CO over nickel-loaded Y-zeolites, Catalysis Letters 28, S. 41-52, 1994
[38] Ashcroft, A.T.; Cheetham, A.K.; Green, M.L.H., Vernon, P.D.F.: Partial oxidation of methane to synthesis gas using carbon dioxide, Nature 352, S. 225-226, 1991
[39] K.; Omata, K.; Nozaki, T.; Yamazaki, O.; Han, Y.: Selective synthesis of liquid hydrocarbons from carbon dioxide and methane, Energy Conversion and Management 33, S. 529-536, 1992
[40] Gadalla, A.M.; Bower, B.: The role of catalyst support on the activity of nickel for reforming methane with CO2, Chemical engineering Science 43, S. 3049-3062, 1988
[41] Gaddalla, A.M.; Sommer, M.E.: Carbon dioxide reforming of methane on nickel catalysts, Chemical Engineering Science 44, S. 2825-2829, 1989

[42] Hofmann, C.: Untersuchungen zur Elektrokatalyse von Hochtemperatur-Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (HT-PEMFCs). Disserstation, Göttingen, 2009
[43] C. R. H. de Smet, M. H. J. M. de Croon, R. J. Berger, G. B. Marin, J. C. Schouten: Design of adiabatic fixed-bed reactors for the partial oxidation of methane to synthesis gas. Application to production of methanol and hydrogen-for-fuel-cells. Chem. Eng. Sci. 56 (2001) 4849-4861
[44] T. Numaguchi, K. Kikuchi: Intrinsic kinetics and design simulation in a complex reaction network: steam-methane reforming. Chem. Eng. Sci. 43 (1988) 2295-2301
[45] S.S. Hla, D. Park, G.J. Duffy, J.H. Edwards, D.G. Roberts, A. Ilyushechkin, L.D. Morpeth, T. Nguyen: Kinetics of high-temperature water-gas shift reaction over iron-based commercial catalysts using simulated coal-derived syngases. Chem. Eng. J. 146 (2009) 148-154
[46] Birth, Zettl, Döhling, Künne: Forschungsbericht Green-FC: Entwicklung und Aufbau einer modularen Labormusteranlage zur Nutzung biogener Energieträger in Brennstoffzellen zur dezentralen Energieerzeugung an unterschiedlichen Netztypen.

INTEGRATION KOMPLEXER DYNAMISCHER SYSTEME IN AUGMENTED REALITY-ANWENDUNGEN IM FABRIKLEBENSZYKLUS

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Andreas Hoffmeyer
Volkswagen AG, Wolfsburg

INTEGRATION KOMPLEXER DYNAMISCHER SYSTEME IN AUGMENTED REALITY-ANWENDUNGEN IM FABRIKLEBENSZYKLUS

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Andreas Hoffmeyer, Volkswagen AG, Wolfsburg

1 Einleitung

1.1 Motivation

Auf internationaler und nationaler Ebene vollziehen sich in der industriellen Produktion und im Dienstleistungsbereich tief greifende Wandlungsprozesse [1].

Globalisierung, steigende Marktdynamik und erhöhter Kostendruck zwingen die Automobilunternehmen zur ständigen innovativen Anpassung ihrer Fabrik- und Produktionsstrukturen. Insbesondere die zunehmende Volatilität im Kaufverhalten der Kunden sowie eine immer stärkere Nachfrage nach individualisierten Produkten stellen hohe Anforderungen hinsichtlich einer flexiblen und qualitätsgerechten Produktion [2].

Ein hoher Planungsaufwand für den Bau neuer Fabriken sowie für die Integration neuer Modelle in bestehende Produktionsstrukturen ist die Folge.

Heute werden diese komplexen Planungsaufgaben mit Hilfe der Digitalen Fabrik, deren Werkzeuge heute insbesondere in der Automobilindustrie etabliert und unverzichtbar sind, realisiert [3]. Die Unterstützung des gesamten Produktentstehungsprozesses durch Virtuelle Techniken ist ein maßgeblicher Erfolgsfaktor [4]. Am Ende des digitalen Fabrikplanungsprozesses stehen jedoch reale Fertigungshallen, Betriebsmittel und Produktionssysteme. Daher ist eine effektive Synchronisation von Realität und der digitalen Planung erforderlich.

Ein Ansatz zur Lösung dieser Problematik stellt die Augmented Reality-Technologie (AR) dar. Sie visualisiert relevante Informationen durch die Überlagerung der realen und virtuellen Welt, wie z.B. die Einblendung des Fahrwegs im Bild der Rückfahrkamera zur Einparkunterstützung. Mit Hilfe der Visualisierung trägt die AR zur Verbesserung einer kulturübergreifenden Kommunikation bei, indem virtuelle Planungskonzepte und Ideen in der realen Umgebung sichtbar gemacht werden.

Derzeit können entlang des Fabriklebenszyklus allerdings nur statische reale Objekte, wie z.B. Stahlbauten oder Montageanlagen, mit ihren virtuellen Pendants synchronisiert werden. Beispiele hierfür sind in der Literatur ausführlich beschrieben [5, 6, 7, 8, 9, 10]. Für eine ganzheitliche Betrachtung von Fertigungsumgebungen ist es unabdingbar deren Dynamik, also laufende Produktionsanlagen oder Fertigungsmitarbeiter, in die AR-Technologie zu integrieren. Dabei geht es nicht nur um die Überlagerung von 3D-Informationen, sondern vielmehr auch um die Generierung von Zusatzinformationen aus der Dynamik der Realität und deren Visualisierung auf geeigneten Ausgabegeräten.

Nur auf diesem Weg können die Potenziale vollständig erschlossen werden. Nachfolgend wird über eine Defizitanalyse bestehender Anwendungen der AR-Technologie im Produkt- und Fabriklebenszyklus und zukünftigen Anwendungsgebieten die Motivation des Themenschwerpunktes verdeutlicht. Weiterhin werden kurz die wissenschaftlichen Grundlagen des Integrationsansatzes dargelegt um anschließend eine erste industrielle Anwendung von komplexen dynamischen Systemen in der AR zu erläutern.

2 Industrielle Anwendungen der Augmented Reality-Technologie

2.1 Heutige Anwendungsfelder

Die Augmented Reality-Technologie wird in zahlreichen industriellen Anwendungen genutzt. Hierbei reichen die möglichen Einsatzbereiche von der Produktentstehung über deren Nutzung hin zur Produktverwertung [5, 11]. Die Automobilindustrie hat sich in den letzten Jahren zum Innovationstreiber für den industriellen Einsatz der AR-Technologie entwickelt und nimmt weiterhin eine Vorreiterrolle ein. Die folgende Abbildung stellt daher mit dem Schwerpunkt der Automobilindustrie wesentliche Anwendungsfelder dar.

Abbildung 1: Anwendungsfelder der AR-Technologie in der Automobilindustrie

Im Design findet die AR-Technologie bei der Visualisierung von unterschiedlichen Farb- und Ausstattungsvarianten Anwendung. Dabei wird ein zentrales Design-Modell aufgebaut und die unterschiedlichen Varianten einer

Gestaltung als virtuelle Ergänzungen am Hardwaremodell augmentiert [12]. Weiterhin wird die AR-Technologie in der Entwicklung als Vergleichswerkzeug für Bauteile und im Prototypenbau zur Aufbauunterstützung eingesetzt. Dabei wird der Mitarbeiter beim Bolzenschweißen durch die visuelle Führung zu den Schweißpunkten unterstützt.
Alle Bereiche, die die Planung, Produktion und den Betrieb betreffen, werden anschließend bei der Analyse der Anwendungsgebiete im Fabriklebenszyklus betrachtet.

Im Bereich After Sales sind vor allem Anwendungen im Fahrzeugservice realisiert worden. Auch hier werden dem Mitarbeiter Zusatzinformationen angezeigt, wie z.B. Reparaturleitfäden. Das Ergebnis einer systematischen Literaturrecherche zur Analyse des Standes der Technik wird in der folgenden Abbildung 2 auszugsweise dargestellt. Aufgrund der Vielzahl der Anwendungen werden in der Tabelle bereits thematisch ähnliche Anwendungen zusammengefasst und die zugehörigen Literaturquellen benannt. Weiterhin wird eine Zuordnung der Anwendungen zu den einzelnen Lebenszyklusphasen einer Fabrik vorgenommen. Zusätzlich wird das Klassifikationskriterium „Dynamik" eingeführt.

Abbildung 3: AR-Unterstützung von Planungsworkshops

Bei der Störkantenanalyse ist es das Ziel mit dem Einsatz der AR-Technologie virtuelle Produktdaten bei ihrem Durchlauf durch die realen Fertigungsanlagen zu verifizieren und Problemstellen zu identifizieren. Dabei wird heute mit einem fotobasierten System gearbeitet, welches allerdings nur sehr begrenzte Arbeitsräume ermöglicht.

Anwendung	Lebenszyklusphase	Dynamik	Quelle
Planungsworkshops, Visualisierung u. Verifikation von Planungskonzepten	Entwicklung	1, 2	[Bad08; Bra11; Hof09; Hof10b]
Störkantenanalyse	Entwicklung	1	[Bad08; Hof10b; Sch11]
Konzeptplanung/ Bauabnahme, Visualisierung von (Um-) Baumaßnahmen	Entwicklung, Aufbau	1	[Alt02; Azu97; Bad08; Hof09; Hof10, Hof10b, Hof11; Kli97; Kli01; Liv98; Nöl07; Rei09a; Tam99]
Soll-/Ist-Abgleich von Betriebsmitteln	Aufbau	1	[Bad08; Bad09; Bad12; Hof10b; Sch08b]
AR-unterstützte Kommissionierung	Betrieb	1	[Rei09; Sch10a; Tüm08; Tüm09]

Abbildung 2: Derzeitige Anwendungen der AR-Technologie im Fabriklebenszyklus - Auszug der Literaturrecherche

Damit erfolgt eine Bewertung der Anwendungen hinsichtlich ihrer Dynamik, wobei eine „1" die „statische" Augmented Reality, eine „2" die „bewegte" AR und eine „3" die Integration komplexer dynamischer Systeme in die AR-Technologie beschreibt.
Es zeigt sich, dass bereits heute alle Phasen des Fabriklebenszyklus mit AR-Anwendungen unterstützt werden, wobei an dieser Stelle keine Beurteilung des Durchdringungsgrades der Anwendungen erfolgt. Nachfolgend werden die fünf dargestellten Anwendungen kurz erläutert. Ein Einsatzgebiet der AR-Technologie in der Fertigungsplanung ist die Unterstützung von Planungsworkshops. Hier wird die reale Workshopumgebung, die aus einem möglichst realen, aus Pappe modellierten Fertigungsbereich besteht, durch die Überlagerung der entsprechenden 3D-Daten erweitert (siehe Abbildung 3).

Neuere Technologieentwicklungen setzen daher auf die Erstellung eines Lichtraumprofils mit Hilfe eines Sensorskids.

Die Konzeptplanung oder AR-gestützte Bauabnahme visualisiert die 3D-Daten des Fabrik Digital Mock Up (DMU) auf der realen Baustelle. Hier konnten in der jüngeren Vergangenheit durch Innovationen der Arbeitsraum des Systems erheblich erweitert und auch die Prozessintegration vorangetrieben werden [11, 13].

Der Betriebsmittelabgleich dient der Überprüfung der vorhandenen CAD-Anlagendaten auf Aktualität. D.h. es wird das 3D-Modell der Anlage auf die reale Anlage überlagert und über eine visuelle Auswertung Abweichungen identifiziert [11, 14].

Der Bauteilvergleich wird im Rahmen der Qualitätssicherung durchgeführt. Auch hier werden ähnlich wie beim Betriebsmittelabgleich 3D-Daten der Bauteile mit ihren realen Repräsentanten abgeglichen. Lediglich die Ausführung des technischen Systems ist unterschiedlich.

2.2 Zukünftige Anwendungsfelder der Augmented Reality in der Automobilindustrie

Aus der Analyse im letzten Kapitel geht hervor, dass sich alle mit der Literaturrecherche identifizierten heute in der Industrie realisierten AR-Anwendungen auf die Überlagerung statischer bzw. in sich unbeweglicher Objekte beschränken. Hierzu wurde bereits in Abbildung 2 für eine Bewertung der Anwendungen das Kriterium „Dynamik" eingeführt, wobei keine Anwendung mit einer 3, also der Integration komplexer dynamischer Systeme in die AR-Technologie, gekennzeichnet werden konnte. Weiterhin werden diese Objekte in der Regel mit einem Koordinatensystem repräsentiert, wie z.B. alle Spanner einer Schweißvorrichtung, die zum Ursprungskoordinatensystem der Anlage referenziert sind. Dieses Verständnis wird mit der folgenden Abbildung dargestellt.
Demnach gibt es ein Ursprungskoordinatensystem in der Realität Kos_{ur} in dem sich ein reales Objekt (Roboter) mit dem Koordinatensystem Kos_{br} befindet. Dieses wird nun mit einem virtuellen Objekt überlagert und somit die AR-Szene generiert. Somit werden Kos_{br} und Kos_{bv} kongruent überlagert, so dass das Objekt im AR-Raum durch Kos_{bar} repräsentiert wird. Selbstverständlich ist es nach dem heutigen Verständnis möglich Verschiebungen zwischen dem Ursprungskoordinatensystem und dem Objektkoordinatensystem bei entsprechender Trackingtechnologie durchzuführen, um so beispielsweise mit einer Kamera um ein augmentiertes Objekt herumzugehen und sich alle Perspektiven anschauen zu können. Ein Beispiel hierfür ist der Einsatz eines AR-Systems mit laserbasiertem Large-Area-Tracking für die Konzeptvisualisierung [13].

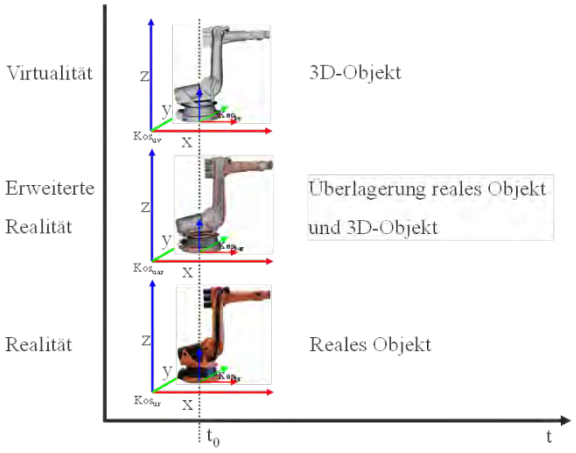


Abbildung 4: Heutiges Verständnis von Augmented Reality

Erste realisierte AR-Anwendungen berücksichtigen die Überlagerung mehrerer Objekte innerhalb eines Ursprungskoordinatensystems. Als Anwendungsbeispiel wird die Unterstützung von Planungsworkshops mit der AR-Technologie herangezogen [15]. Dabei werden mehrere voneinander unabhängige Koordinatensysteme Kos_{br} in Relation zum Ursprungskoordinatensystem Kos_{ur} entlang s_1 bewegt und in der AR-Szene entsprechend mit 3D-Daten überlagert (siehe Abbildung 5). Bereits bei der „bewegten" AR tritt als limitierender Faktor das Problem der Latenz auf. Unter Latenzzeit wird der Zeitversatz zwischen der Änderung des realen Objekts und der Überlagerung in der AR-Szene verstanden [5].

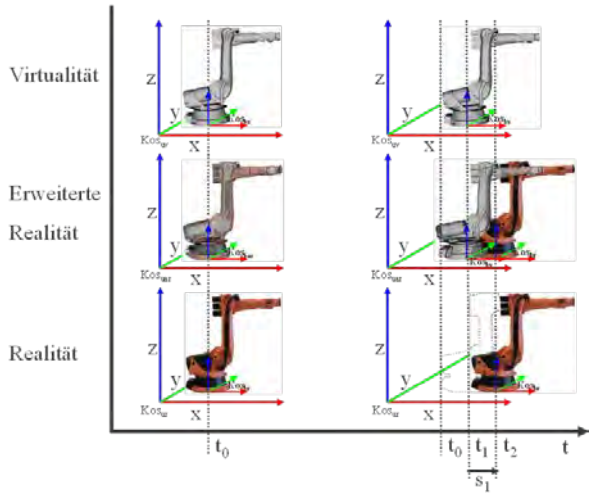


Abbildung 5: Erweitertes Verständnis von AR - Bewegte AR

Mit diesen Technologiegrundlagen können heute bereits zahlreiche Anwendungen im industriellen Umfeld mit der AR unterstützt werden.

Zukünftige Anwendungen werden sich jedoch nicht auf die Betrachtung einfacher Objekte beschränken können. Die Mehrzahl der in der Industrie eingesetzten Anlagen und Gebäudeausstattungen sind komplexe Objekte, die sich aus unterschiedlichen Teilobjekten zusammensetzen.
So könnte mit der AR-Technologie ein Roboterprogramm mit dem realen Ablauf in der Produktion verglichen werden. Ein weiteres Beispiel im Produktentstehungsprozess ist die Visualisierung der inneren Elemente beim Öffnen eines Cabrio Daches für Reparatur- oder Trainingszwecke.
Demnach geht es um die Betrachtung komplexer dynamischer Systeme.

Auch der Mitarbeiter kann als komplexes technisches System abgebildet werden. Somit können durch den AR-Einsatz aus der Prozessaufnahme Zusatzinformationen (Ergonomiebewertung, MTM-Analyse) generiert und in der AR-Szene visualisiert werden.

Die folgende Abbildung 6 stellt exemplarisch diesen Sachverhalt dar:

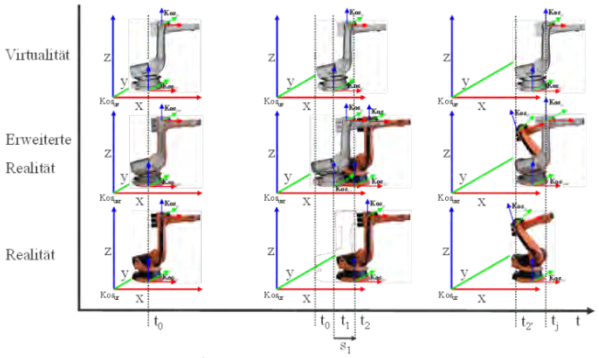


Abbildung 6: Herausforderung komplexer dynamischer Systeme

Es ist zu erkennen, dass vom Zeitpunkt t_1 zu t_2 das Objekt an sich im Raum entlang einer Strecke s_1 bewegt wird und von t_2 zu $t_{2'}$ eine Bewegung des Objektes in sich stattfindet. Der hier als Beispiel eines komplexen dynamischen Systems ausgewählte Roboter setzt sich demnach aus mehreren Elementen zusammen, die über Gelenke miteinander verbunden sind. Somit ergeben sich bis zu sechs Roboter-Achsen. Ähnlich wie bei diesem Beispiel stammen fast alle technischen Systeme aus der Automobilindustrie, da sie sich in der Regel aus verketteten Einzelelementen zusammensetzen. Weitere Beispiele sind Förderanlagen oder Einbaumanipulatoren.

Die Integration solcher Systeme in die AR-Technologie stellt eine große Herausforderung dar. Neben dem zurücklegen einer Strecke, und der dadurch entstehenden Latenzzeit kommt hier die Latenzzeit aus der Überlagerung der unterschiedlichen Stellungen der Teilobjekte zueinander hinzu.

3 Integration komplexer dynamsicher Systeme in die AR-Technologie

3.1 Definitionen und Abgrenzung

Für das weitere Verständnis des Beitrags werden nachfolgend kurz die wichtigsten Grundlagen und Definitionen zusammengefasst.

Augmented Reality

Augmented Reality (Erweiterte Wirklichkeit) ist eine neue Form der Mensch-Technik-Interaktion [16]. Dabei existieren unterschiedliche Ansätze für eine Umschreibung dieses Begriffes. In diesem Beitrag wird die in der internationalen Fachwelt anerkannten Definition für den Einsatz der AR-Technologie im industriellen Umfeld von Ronald Azuma verwendet. Demnach beschreibt der Begriff „Augmented Reality" die Ergänzung der visuellen Wahrnehmung des Menschen durch die situationsgerechte Anzeige von rechnergenerierten Informationen auf im Sichtfeld des Anwenders positionierten Geräten [17].

Weiterhin konkretisiert Azuma [18] die Definition durch die Einführung folgender drei Charakteristika:

- Kombination von Realität und Virtualität
- Interaktion in Echtzeit
- Dreidimensionale Beziehung zwischen virtuellen und realen Objekten (Registrierung)

Komplexes dynamisches System

Ein komplexes dynamisches System besteht aus einer großen Anzahl von Elementen. Die mikroskopischen Zustände der Elemente bestimmen den makroskopischen Zustand des Systems. In einem technischen System ist der Zustand eines Körpers zu einem Zeitpunkt durch seinen Ort und seine Geschwindigkeit bestimmt. Die Dynamik des Systems, d.h. die Änderung der Systemzustände in Abhängigkeit der Zeit, wird durch nichtlineare Differentialgleichungen beschrieben.

Zur Simulation komplexer technischer Systeme werden vielfach Modelle von Mehrkörpersystemen (MKS) verwendet. Diese bestehen aus starren oder elastischen Körpern, die durch Koppelelemente (Gelenke, Kräfte, Regelelemente) untereinander bzw. mit dem Fundament verbunden sind und unter der Wirkung von Kräften stehen [19, 20]. In dieser Ausarbeitung wird der Begriff eines dynamischen Systems in Bezug auf die Integration in die AR-Technologie in Anlehnung an [21, 22] wie folgt definiert:

Als dynamisches System wird ein mechanisches System bezeichnet, das unter der Einwirkung von Kräften und Momenten steht. Dabei wird von einem komplexen System gesprochen, wenn mindestens 6 einzelne Körper über mechanische Verbindungen gekoppelt sind. Diese Systeme werden mit der AR-Technologie kongruent mit ihren virtuellen Pendants in Echtzeit überlagert und weiterhin Zusatzinformationen aus der Registrierung des realen Systems ermittelt und in der erweiterten Realität visualisiert.

Zur weiteren Beschreibung und Modellierung des Integrationsansatzes der komplexen dynamischen Systeme in die AR-Technologie werden die im vorigen Kapitel erläuterten Abbildungen in Anlehnung an [23] formalisiert. Abbildung 7 stellt die Formalisierung dar. Es wird ein Roboter in seine drei Teilobjekte R_1, R_2 und R_3 untergliedert, die über zwei Gelenke G_{12} und G_{23} miteinander verbunden sind. In der formalisierten Darstellung werden die Körper oder Objekte durch quadratische Kästchen und die Gelenke durch deren Verbindung symbolisiert.

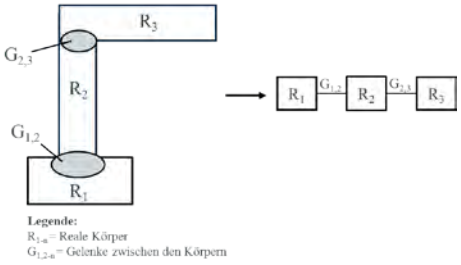


Abbildung 7: Formalisierung der Beschreibung

In Abbildung 8 wird die formalisierte Darstellung mehrdimensional erweitert. Demnach kann ein komplexes dynamisches System aus R_{1-n} Körpern in der Realität bestehen. Weiterhin sind diese jeweils mit Gelenken G_{R12-n} verbunden Für eine kongruente Überlagerung mit der AR-Technologie ist es erforderlich für jeden realen Körper ein virtuelles Pendant zu verwenden. Diese werden mit V_{1-n} bezeichnet und sind ebenfalls durch Gelenke G_{V12-n} verbunden. Um eine Synchronisation S_{1-n} zwischen dem realen Objekt und seiner Teilkörper mit dem virtuellen Pendant herzustellen ist die Aufnahme mit geeigneten Trackingsystemen erforderlich. Dafür ist für jeden realen Körper ein Koordinatensystem K_{1r-nr} zu verwenden. Gleiches gilt für die virtuellen Körper K_{1v-nv}.

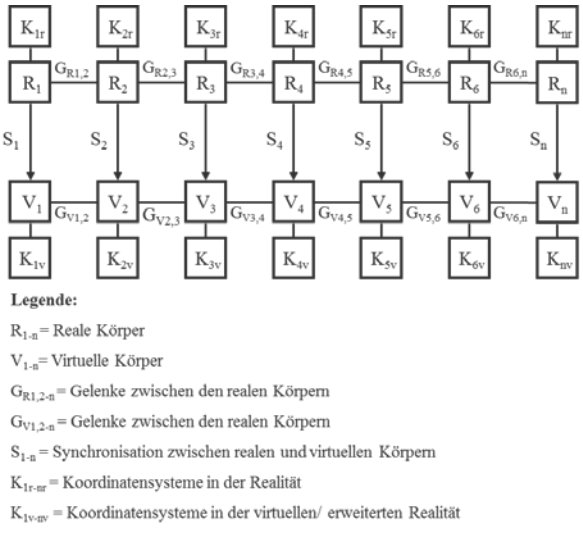


Abbildung 8: Erfassung komplexer technischer Systeme

3.2 Lösungsansatz

Um ein komplexes dynamisches System in die AR-Technologie zu integrieren sind differente Lösungsansätze denkbar. Abbildung 9 visualisiert, die bis heute bekannten Möglichkeiten. Demnach ist zunächst zu unterscheiden, ob es sich um ein bekanntes oder ein unbekanntes System handelt, wobei mit „bekannt" der mechanische Aufbau gemeint ist. Handelt es sich um ein bekanntes System ist eine Lösungsmöglichkeit die Erfassung aller realen Objekte über ein Trackingsystem.

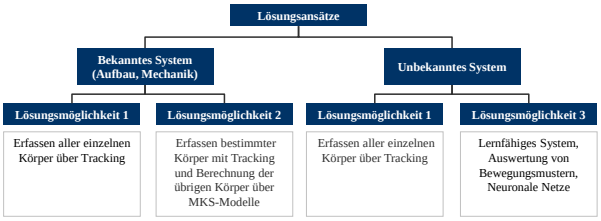

Lösungsansätze
Bekanntes System (Aufbau, Mechanik)
Unbekanntes System
Lösungsmöglichkeit 1
Erfassen aller einzelnen Körper über Tracking
Lösungsmöglichkeit 2
Erfassen bestimmter Körper mit Tracking und Berechnung der übrigen Körper über MKS-Modelle
Lösungsmöglichkeit 1
Erfassen aller einzelnen Körper über Tracking
Lösungsmöglichkeit 3
Lernfähiges System, Auswertung von Bewegungsmustern, Neuronale Netze

Abbildung 9: Lösungsmöglichkeiten zur Integration komplexer dynamischer Systeme in die AR-Technologie

Diese Lösungsalternative ist auch bei einem unbekannten System denkbar, da hierbei die mechanische Beschreibung nicht zwingend erforderlich ist. Dies ist jedoch nur in begrenztem Maße zu realisieren, da mit zunehmender Markeranzahl die Bildwiederholrate der AR-Szene abnimmt und gleichzeitig die Latenzzeit zunimmt. Hierzu wurde ein Laborversuch durchgeführt, bei dem die Auswirkungen der Koordinatensystemanzahl auf die Framerate bei optischen AR-Systemen untersucht wurden. Das Ergebnis des Versuchs zeigt Abbildung 10. Demnach ist Lösungsmöglichkeit 1 bis zu einer Systemgröße von max. 19 Körpern unter Gewährleistung des Echtzeitkriteriums anwendbar.

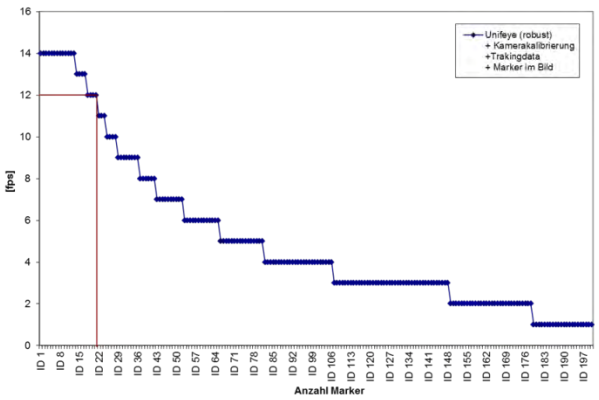
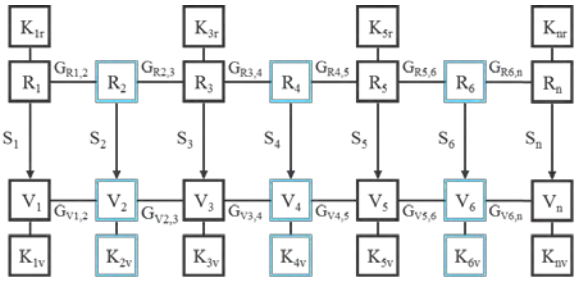


Abbildung 10: Ergebnisse Versuch Auswirkungen der Koordinatensystemanzahl auf die Framerate bei optischen AR-Systemen

Ist eine Erfassung aller Körper aufgrund von Performanceproblemen oder Schwierigkeiten bei der technischen Umsetzung der Marker nicht möglich, so wird als zweite Alternative das Erfassen ausgewählter Körper mit Markern und die Berechnung der restlichen Körper über MKS-Modelle eingeführt (siehe Abbildung 11). Dabei ist zu beachten, dass die Zeit zur Berechnung des MKS-Modells geringer sein muss, als die Latenzzeit, welche durch das Erfassen eines zusätzlichen Markers anstelle seiner Berechnung auftreten würde.

Dieser Lösungsansatz wird in diesem Beitrag in den Vordergrund gestellt und weiter untersucht.
Als weitere Lösungsmöglichkeiten bei einem unbekannten System könnten beispielsweise lernfähige Systeme, die Auswertung von Bewegungsmustern oder der Einsatz neuronaler Netze in Frage kommen.



Legende:

R_{1-n} = Reale Körper

V_{1-n} = Virtuelle Körper

$G_{R1,2-n}$ = Gelenke zwischen den realen Körpern

$G_{V1,2-n}$ = Gelenke zwischen den realen Körpern

S_{1-n} = Synchronisation zwischen realen und virtuellen Körpern

K_{1r-nr} = Koordinatensysteme in der Realität

K_{1v-nv} = Koordinatensysteme in der virtuellen/ erweiterten Realität

Abbildung 11: Integrationsansatz MKS-Berechnung

3.3 Grundlagenuntersuchung zur Validierung des Lösungsansatzes

Der im vorigen Kapitel beschriebene Lösungsansatz über den Einsatz von MKS-Modellen wird anhand eines Pilotversuchs evaluiert. Dabei wird als Beispiel der menschliche Körper ausgewählt, da dessen Integration auch das erste industrielle Zielszenario erfordert. Der Versuch wird unter Laborbedingungen durchgeführt. Zunächst wird der prinzipielle Versuch beschrieben:

Als Trackingsystem werden 8 ARTtrack3 Infrarotkameras verwendet. Diese erfassen 17 ART-Targets mit insgesamt 68 retroflexiven Markern bei 60 Hz hochgenau (ca. 2-5mm Abweichung). Die Trackingsoftware liefert daraufhin die berechnete Lage und Orientierung der 17 Targets über eine UDP Verbindung an einen Datenerfassungsrechner. Dieser zeichnet den ART-Datenstrom echtzeitfähig auf, visualisiert ihn und berechnet auf der Grundlage dieser Daten die Inverse Kinematik (IK) des unterliegenden Menschmodelles Dynamicus. Des Weiteren können so die Ergebnisse der Inversen Kinematik auf dem Datenerfassungsrechner dargestellt werden.

Zur korrekten Einbettung des Menschmodells in eine Umgebung wird die mit dem A.R.T.-System erfasste Bewegung auf das Menschmodell Dynamicus übertragen.
Dynamicus ist ein Mehrkörpersystem und besteht aus starren Körpern und Gelenken, die die Bewegungsmöglichkeiten des Menschen realisieren. Die Individualität des Probanden wird mit Hilfe eines Anthropometriemodells relativ genau durch kinematische Abmessungen (Segmentlängen) und Masseverteilung abgebildet. Für den Echtzeit-Prototypen werden zunächst nur die Bewegungsmöglichkeiten für den Rumpf mit Wirbelsäule, Kopf mit Halswirbelsäule, die Beinkette und die Schultergelenke berücksichtigt. Alle Gelenke sind als Kugelgelenke modelliert.

Es wird ein hoch aufgelöstes Rumpfmodell bestehend aus 17 einzelnen Wirbelkörpern verwendet, mit dem die Krümmung der Wirbelsäule realitätsnah beschrieben werden kann.

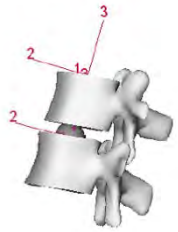


Abbildung 12: Kugelgelenk zwischen 2 Wirbelkörpern

Abbildung 13: Kinematikmodell des Rumpfes

Aus dem Motion-Capture-System sind für jedes Target die Position und die Orientierung bekannt. Im Modell des Probanden entspricht jedem Target ein körperfester Marker (Position und Orientierung), der auf dem entsprechenden Segment befestigt ist.

Durch einen Kalibriervorgang wird die körperfeste Position dieses Markers in Bezug auf das Segmentkoordinatensystem festgelegt.

Die Übertragung der Bewegung der Targets auf das Modell, also die Simulation der inversen Kinematik, erfolgt in der Nicht-Echtzeit-Umgebung durch Lösung eines nichtlinearen Optimierungsproblems für jeden Zeitschritt. Dabei werden die Abweichungen zwischen den getrackten Positionen und Orientierungen der Targets und den entsprechenden Markern auf den Segmenten des Modells minimiert. Variable sind die Relativbewegungen in den Gelenken des Menschmodells. Messfehler, Markerausfälle etc. können über Gewichtsfaktoren kompensiert werden. Fehlende Messdaten können durch experimentell ermittelte Bewegungsmuster ergänzt werden. Dies geschieht z.B. für die Bewegung der Wirbelsäule, deren Bewegung nur durch das Becken- und Brusttarget erfasst wird.

Für die Echtzeit-Anwendung in der AR-Umgebung kann das Optimierungsverfahren nicht benutzt werden, da es nicht mit einer konstanten Rechenzeit pro Zeitschritt betrieben werden kann. Hier wird das entsprechende nichtlineare Gleichungssystem mit einem Newton-Verfahren gelöst. Die effiziente Erzeugung der Jacobi-Matrix geschieht durch analytisch berechnete Ableitungen

der Markerabweichungen und der Bewegungsmuster. Die Effizienz und Robustheit des Verfahrens wird im Rahmen aktuell laufender Forschungsprojekte weiter verbessert [25, 26].

Die berechneten Ergebnisse für Lage und Orientierung der Körper des Menschmodells werden dann wiederum in den Datenstrom im ART-Format konvertiert und an einer Netzwerkschnittstelle zur Visualisierung bereitgestellt. Zur Visualisierung der Körper im kalibrierten Raum wird die Software Unifeye von der Firma verwendet.

Um eine kongruente und somit korrekte Darstellung in der AR-Szene zu gewährleisten ist eine möglichst präzise Registrierung erforderlich. Demnach ist eine Kalibrierung zwischen dem Kamerakoordinatensystem und dem Ursprungskoordinatensystem des Infrarottrackingsystems durchzuführen [6, 13] und der Offset in die Trackingdatei einzugeben. Anschließend erfolgt die Visualisierung mit der Software Unifeye unter Nutzung einer kalibrierten USB-Kamera mit einer Auflösung von 1024x768 Pixeln und einer Bildrate von 10-15 FPS.

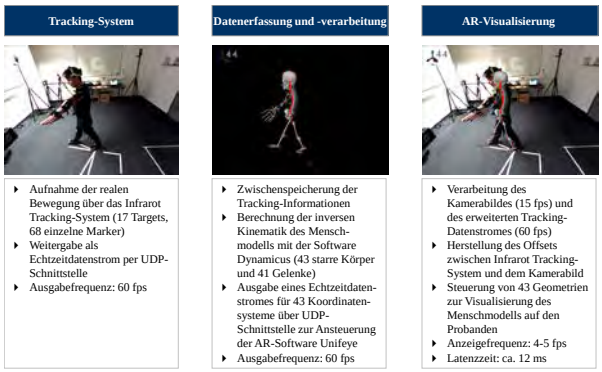

Tracking-System
Datenerfassung und -verarbeitung
AR-Visualisierung
Aufnahme der realen Bewegung über das Infrarot Tracking-System (17 Targets, 68 einzelne Marker)
Weitergabe als Echtzeitdatenstrom per UDP-Schnittstelle
Ausgabefrequenz: 60 fps
Zwischenspeicherung der Tracking-Informationen
Berechnung der inversen Kinematik des Menschmodells mit der Software Dynamicus (43 starre Körper und 41 Gelenke)
Ausgabe eines Echtzeitdatenstromes für 43 Koordinatensysteme über UDP-Schnittstelle zur Ansteuerung der AR-Software Unifeye
Ausgabefrequenz: 60 fps
Verarbeitung des Kamerabildes (15 fps) und des erweiterten Tracking-Datenstromes (60 fps)
Herstellung des Offsets zwischen Infrarot Tracking-System und dem Kamerabild
Steuerung von 43 Geometrien zur Visualisierung des Menschmodells auf den Probanden
Anzeigefrequenz: 4-5 fps
Latenzzeit: ca. 12 ms

Abbildung 14: Prototypische Realisierung des Lösungsansatzes

Insgesamt kann mit dem Pilotversuch die Machbarkeit des Integrationsansatzes bestätigt werden. Allerdings gibt es noch klare Einschränkungen bei der Performance, so dass für die industrielle Einsetzbarkeit einer Echtzeitlösung weitere Untersuchungen durchzuführen sind. Im nächsten Kapitel wird daher zunächst von der Echtzeitlösung Abstand genommen und eine Video-basierte AR-Lösung angestrebt bei der die Aufnahme der Realität, Berechnung und Visualisierung nacheinander abgearbeitet werden.

4 Integration komplexer dynamischer Systeme in die AR-Technologie am Beispiel der Visualisierung von Ergonomiedaten bei der Analyse manueller Fertigungsprozesse in der Automobilmontage

Um den zukünftigen Anforderungen hinsichtlich einer ganzheitlichen Ergonomiebewertung der Arbeitsplätze in Montage- und Fertigungsprozessen gerecht zu werden, wurde im Rahmen des AVILUS Forschungsprojektes [26] ein hybrides Motion Capturing System zur Bewegungserfassung und Übertragung von Montageprozessen in eine computerlesbare Form unter Berücksichtigung der zeitlichen Komponente bei einer Ergonomiesimulation entwickelt.

Um den Entwicklungstendenzen Folge zu leisten, die von einem steigenden Altersdurchschnitt der Belegschaft ausgehen, wird in der Automobilindustrie vermehrt der Wert auf die Generierung ergonomisch günstiger Arbeitsplätze gelegt. Da die bisherigen Werkzeuge der Digitalen Fabrik nur eingeschränkte Bewertungen der Ergonomie, besonders im Hinblick auf Prozesse, bieten, wurde ein System entwickelt, welches diesen Standard zukünftig gewährleisten kann.

Die Beurteilung des Bewegungsablaufes im Montage- und Fertigungsprozess wird nach dem EAWS-Verfahren (European Assembly Worksheet) vorgenommen. Dieses ist seit 2009 bei Volkswagen konzernweiter Standard. EAWS ermöglicht eine ganzheitliche Bewertung der Ergonomie, indem es sowohl die Intensität als auch die Dauer einer Belastung betrachtet.

Konzipiert wurde das EAWS als Screening-Verfahren für den Einsatz innerhalb der Planungsprozesse und für die Produktionsphase. Dies trägt den Vorgaben der EU Richtlinie zu Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz (89/391/EWG zit. nach [27]) als auch der EU-Maschinenrichtlinie (89/392/EEC, 98/37/EG, 2006/42/EG zit. nach [28]) Rechnung. Aufgrund seiner Komplexität kann es jedoch nicht nur in diesem Bereich eingesetzt werden, sondern findet in allen Phasen eines Produktentstehungsprozesses Einsatz.

Das als Papier-Bleistift-Methode umgesetzte Screening-Verfahren entspricht einer Gefährdungsanalyse, die als Ergebnis Belastungspunkte für ergonomisch ungünstige Arbeitssituationen vergibt. Dabei werden Belastungsmerkmale wie Häufigkeit, Körperhaltung, Kräfte, Lasten und auch Ausführungsbedingungen in einem ersten Schritt objektiv dokumentiert, um sie dann mit Hilfe einer Punktsummenrechnung zu bewerten. Die durch die Wichtung verschiedener Risikofaktoren vergebenen Punkte werden addiert und es entsteht ein Gesamtpunktwert [27]. Dieser wird analog dem Ampelprinzip in eine der drei Risikobereiche eingestuft [28].

- 0 bis ≤30 Punkte GRÜNE ZONE: niedriges Risiko Maßnahmen sind nicht erforderlich. Das Risiko einer Erkrankung ist vernachlässigbar.
- >30 bis <50 Punkte GELBE ZONE: mögliches Risiko Maßnahmen zur erneuten Gestaltung ergreifen. Insgesamt oder teilweise besteht für die Operatoren ein nicht vernachlässigbares Risiko einer Erkrankung.

– ≥50 Punkte ROTE ZONE: hohes Risiko Maßnahmen zur Risikobeherrschung erforderlich. Offensichtliches und nicht annehmbares Risiko einer Erkrankung oder Verletzung.

Hybrides Motion Capturing-System

Für die Bewegungserfassung eines Mitarbeiters im Bereich um und in einer PKW-Karosse, wird ein hybrides Motion Capturing Trackingsystem verwendet. Dieses besteht aus einem optischen Outside-In System, um absolute 6 DOF (degrees of freedom) zu liefern, und einem inertialen, relativ messenden System, um das Tracking außerhalb des FOV (field of view) der Trackingkameras zu gewährleisten. Für das optische System der Firma Advanced Realtime Tracking GmbH (kurz: A.R.T.) sind mindestens acht ARTtrack3 Kameras mit einer Brennweite f=4,5mm für das Übersichtstracking notwendig.

Weitere zwei ARTtrack3 Kameras mit einer Brennweite f=3,5mm sind für das Tracking in einer Kalibrierposition vorgesehen. Die Infrarot-Kameras vom Typ ARTtrack3 besitzen eine Auflösung von 640x480 Pixel und emittieren Infrarot-Blitze in einer Wellenlänge von 880 nm. Die Kameras müssen in ihrer Position und Orientierung zueinander fest sein. Das gesamte optische Trackingsystem wird durch einen ATC (ARTtrack Controller) gesteuert. Zur Initialisierung des Systems ist es notwendig einen Kalibrierwinkel in den leeren Trackingbereich zu legen und das Volumen mit einem Kalibrierstab einzumessen.

Abbildung 15: Systemkomponenten für ein hybrides Motion Capturing System

Für das Ganzkörpertracking werden 17 optische Targets benötigt. Die dabei verwendeten passiven Marker sind mit einer zusätzlichen transparenten Folie versehen, um sie gegen Abrieb zu schützen. Zu den optischen Targets muss der Proband noch zusätzlich 11 inertiale Sensoren der Firma Biosyn Systems anlegen.

Die Erfassung der Position des Mitarbeiters beim inertialen System erfolgt über Beschleunigungs-, Winkel- und magnetische Sensoren. Wenn es durch die Umgebung zu Sichtbehinderungen zwischen Infrarotkamera und Reflektionsmarker kommt, springt das Inertialsensor-System ein. Dadurch wird gewährleistet, dass kontinuierlich verlässliche Daten geliefert werden und eine durchgängige Erfassung der Daten möglich ist. Dieses System ist in einem weiteren Kalibrierschritt mit dem optischen System zu verbinden.

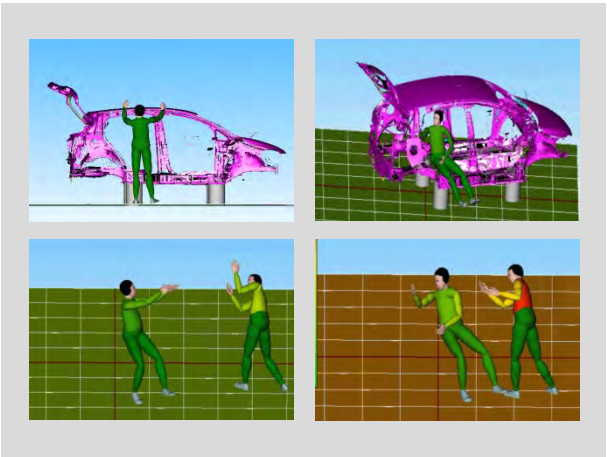


Abbildung 16: Bewegungserfassung und EAWS-Bewertung mit einem hybriden Motion Capturing System

Das hybride Motion Capturing System wird erstmalig als Pilotsystem im Rahmen der 3P Workshops (Production Preparation Process) des VW 370 in Wolfsburg eingesetzt und getestet. Mit Hilfe des Systems wird die Bewegung des Mitarbeiters während eines Montagetaktes erfasst und nach dem EAWS-Verfahren bewertet. Nachdem die Bewegungen des Mitarbeiters aufgezeichnet wurden, erzeugt der Computer aus den Daten das abstrakte 3D-Modell eines Menschen.

Daraus kann auf Basis des EAWS-Verfahrens beispielsweise abgeleitet, welche Bewegungsabläufe belastend sind und welche nicht. Diese Informationen können dann weiter in Datenbanken gespeist oder auch zur Demonstration des Ergebnisses durch unterschiedliches Einfärben des Menschmodells in der AR-Visualisierung, der stark belasteten Gliedmaße, genutzt werden.

Das hybride Motion Capturing System befindet sich derzeit in der Pilotierungsphase. Der Einsatz im Rahmen der 3P Workshops dient zur Validierung der mit dem Motion Capturing System aufgenommen und ausgewerteten EAWS-Werte. Im Laufe der Workshops soll ein ausreichend großer Stichprobenumfang gesammelt werden um anschließend eine aussagekräftige Bewertung der Validierung durchführen zu können.

Aktuell wurden bereits 38 Arbeitsplätze aufgenommen und bewertet. Die EAWS-Werte vom MoCap-System werden im Folgenden mit dem aktuellen Datenblatt des EAWS-Verfahrens, Version 1.3.2.c (IAD 2009), auf Basis der Papier-Bleistift-Methode verglichen.

Ein erster Vergleich der 38 aufgenommenen Arbeitsplätze liefert folgende Ergebnisse:

	Papier-Bleistift-Methode	*MoCap-System*
EAWS 0-30	22	15
EAWS 30-50	13	13
EAWS >50	3	10
∑	38	38

Im Laufe der weiteren Untersuchungen und Vergleiche zwischen den beiden Methoden wird das Motion Capturing System kontinuierlich verbessert und Anpassungen bei der Umsetzung des EAWS-Verfahrens durchgeführt werden. Erste Ergebnisse haben gezeigt, dass die Automatisierung des EAWS-Verfahrens im Bereich der Lastenhandhabung, Fingerkräfte und Körperhaltungen positiv umgesetzt ist.

Diese erste industrielle Anwendung verdeutlicht die Notwendigkeit komplexe dynamische Systeme in die AR-Technologie zu integrieren und zeigt neben den methodischen Handlungsbedarfen die Forderung nach leistungsstärkeren Hardwarekomponenten, um solche Anwendungen zukünftig in Echtzeit realisieren zu können, auf.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zu Beginn des Beitrags wurden allgemeine Anwendungen der AR-Technologie im Produktentstehungsprozess aufgezeigt. Weiterhin werden explizit Anwendungen im Bereich der Produktions- und Fabrikplanung vorgestellt. Anschließend konnte über zukünftige Handlungsfelder die Integration komplexer dynamischer Systeme in die AR-Technologie motiviert werden. Nach der Erläuterung der theoretischen Grundlagen und der einhergehenden Formalisierung des Integrationsansatzes wird eine vielversprechende Lösungsmöglichkeit, die Nutzung von MKS-Modellen, in Form eines Pilotversuchs evaluiert. Dabei konnte festgestellt werden, dass aufgrund der hohen Technologieanforderungen bei Hardware und Software keine Echtzeitlösung umgesetzt werden konnte. Daher wurde nachfolgend eine automatisierte Ergonomiebewertung mit Hilfe eines Motion-Capture-Systems und dem zu Grunde liegenden MKS-Modell als erste industrielle Anwendung eingeführt.

Zukünftig wird die Entwicklung geeigneter mathematischer Verfahren zur Echtzeitberechnung der komplexen MKS-Modelle im Vordergrund stehen um den Einsatz der AR-Technologie auf komplexe dynamische Systeme zu erweitern. Des Weiteren ist für die vorgestellte Anwendung die Evaluierung der softwaretechnischen EAWS-Bewertungsmethodik abzuschließen und in eine Echtzeitlösung zu überführen, so dass direkt eine visuelle Ausgabe der Ergonomiedaten in der AR-Szene umgesetzt ist.

Insgesamt führt der Beitrag ein neues Themenfeld in die wissenschaftliche Betrachtung der Augmented Reality ein und zeigt in diesem Bereich weiteren Forschungsbedarf auf.

Somit kann die AR-Technologie zukünftig noch für deutlich mehr Anwendungen im industriellen Umfeld als effiziente Schnittstelle zwischen der Realität und der Digitalen Fabrik dienen.

6 Literatur

[1] Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E.: Factory Planning Manual. Publisher: Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany 2010 - ISBN 978-3-642-03634-7.

[2] Mallon, J.: Untersuchung kontinuierlicher Produktivitätsverbesserungen in der Neuen Fabrik. Fortschrittsberichte VDI, vol. 2, Nr. 551, VDI Verlag, 2000.

[3] Bracht, U.; Masurat, T.: The digital factory between vision and reality. In: Computers in industry, 2005, Issue 4, Pages 325-333; www.sciendirect.com.

[4] Schenk, M.; Schumann, M.; Schreiber, W.: Die Innovationsallianz Virtuelle Techniken – ein Beitrag zum Virtual Engineering am Standort Deutschland. In: Augmented und Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier (Hrsg.). Mai 2009, Paderborn.

[5] Alt, T.: Augmented Reality in der Produktion. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau, 2002.

[6] Pentenrieder, K.: Augmented Reality based Factory Planning. Dissertation, Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, 2009.

[7] Timmermans, J.: MARY – Konzeption und Bewertung eines Augmented-Reality-gestützten Systems zur Optimierung des Bauprojektzyklus. Dissertation, Technische Universität München, Fakultät für Architektur, 2006.

[8] Tegtmeier, A.: Augmented Reality als Anwendungstechnologie in der Automobilindustrie. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau, 2007.

[9] Tümler, J.: Untersuchungen zu nutzerbezogenen und technischen Aspekten beim Langzeiteinsatz mobiler Augmented Reality Systeme in industriellen Anwendnungen. Dissertation, Otto-

von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Informatik, 2009.

[10] A. Hoffmeyer, C. Bade, F. Doil: Konzept zur Realisierung einer Augmented Reality gestützten Bau- und Layoutplanung mit Hilfe eines laserbasierten Large-Area-Trackings. In: Tagungsband der 12. IFF Wissenschaftstage: Digitales Engineering zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme. VR und AR - Automotive. Magdeburg, 2009, S. 311-322

[11] Bade, C.: Untersuchungen zum Einsatz der Augmented Reality Technologie für Soll/Ist-Vergleiche von Betriebsmitteln in der Fertigungsplanung. Dissertation, , Otto-von-Guericke-Universität, Fakultät für Informatik, Magdeburg, 2012.

[12] Nölle, S.: Augmented Reality als Vergleichswerkzeug am Beispiel der Automobilindustrie. Dissertation, Technische Universität München, Fachbereich Informatik, 2007.

[13] Bade, C.; Hoffmeyer, A.; Alberdi, A.: Entwicklung und Einsatz eines AR-Systems mit laserbasierten Large-Area-Tracking. In: Tagungsband: Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 295, J. Gausemeier, M. Grafe –. Paderborn, 2011.

[14] Bade, C.; Doil, F.; Hoffmeyer, A.: Industrielle Anwendung von Augmented Reality in der Fertigungsplanung bei der Volkswagen AG. In: Tagungsband 11. IFF-Wissenschaftstage, Magdeburg, 2008.

[15] Hoffmeyer, A.; Busche, C.; Doil, F.: Industrieller Einsatz von Motion Capturing zur Unterstützung von Planungsworkshops bei der Volkswagen AG. In: 13. IFF-Wissenschaftstage, Magdeburg, 2010.

[16] Ludwig, C.; Reimann, C.: Augmented Reality Information im Fokus. C-LAB Report, Vol. 4, No. 1, Cooperative Computing & Communi-cation Laboratory, Paderborn, 2005.

[17] Azuma, R. et al.: Recent Advances in Augmented Reality. In: IEEE Computer Graphics and Applications 21, 6 (Nov/Dec 2001), 34-47.

[18] Azuma, R.: A Survey of Augmented Reality. In:Presence: Teleoperators and Virtual Environments 6, Seiten 355-385, MIT Press, 1997.

[19] Schwertassek, R.; Wallrapp, O.: Dynamik flexibler Mehrkörpersysteme. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, Wiesbaden, 1999.

[20] Wittenburg, J.: Dynamics of Multibody Systems. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2008.

[21] Bremer, H.: Dynamik und Regelung mechanischer Systeme. Teubner Verlag, Stuttgart, 1988.

[22] Roddeck, W.: Einführung in die Mechatronik. 3. Überarbeitete und ergänzte Auflage, Teubner, Wiesbaden, 2006.

[23] Murray, R. M.; Li, Zexiang; Sastry, S. Shankar: A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. CRC Press, 1. Auflage, Boca Raton Florida, 1994.

[24] Dynamicus – Referenz- und Benutzerhandbuch, Chemnitz: Institut für Mechatronik, 2010.

[25] Keil, A.; Härtel, T.; Toledo Munoz; B., Busche, C.; Hoffmeyer, A.; Berücksichtigung der zeitlichen Komponente bei einer Ergonomiesimulation, in Mensch- und prozessorientierte Arbeitsgestaltung im Fahrzeugbau, Tagungsband zur Herbstkonferenz 2010 der GfA, S. 105-121, Dortmund, GfA-Press.

[26] AVILUS (Angewandte virtuelle Technologien im Produkt- und Produktionsmittellebenszyklus), Ein Projekt der Innovationsallianz Virtuelle Techniken gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), www.avilus.de

[27] Einstufungshilfe zum Screening-Verfahren – European Assembly Worksheet, Institut für Arbeitswissenschaften Darmstadt und Internationales MTM Direktorat, 2009.

[28] DIN EN 614. Ergonomische Gestaltungsgrundsätze. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, 2009.

AUTOREN

Adler, Simon, M.Sc.
Virtual Engineering
Fraunhofer IFF

Baum, Tobias
Biosystems Engineering
Fraunhofer IFF

Behrendt, Fabian, Dipl.-Wirtsch.-Ing.
Institut für Logistik und Materialflusstechnik
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Birth, Torsten, Dipl.-Ing.
Prozess- und Anlagentechnik
Fraunhofer IFF

Brade, Tino, Dipl.-Inf.
Institut für Verteilte Systeme
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Brandau, Annegret, Dipl.-Math.
Institut für Logistik und Materialflusstechnik
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Cao, Liu, Dipl.-Ing.
Materialflusstechnik und -systeme
Fraunhofer IFF

Haase, Tina, Dipl.-Ing.
Virtuell Interaktives Training
Fraunhofer IFF

Haus, Johannes
Institut für Verfahrenstechnik
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Hoffmeyer, Andreas, Dipl.-Wirtsch.-Ing.
Volkswagen AG
Wolfsburg

Kaiser, Alexander, Dipl.-Wirtsch.-Ing.
Institut für Logistik und Materialflusstechnik
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Kaiser, Jörg, Prof.
Institut für Verteilte Systeme
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Kernchen, Alexa, Dipl.-Inf.
Virtual Engineering
Fraunhofer IFF

Kretschmer, Franka, Dipl.-Ing.
Institut für Verfahrenstechnik
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Kutzler, Tobias, Dipl.-Inf.
Logistik- und Fabriksysteme
Fraunhofer IFF

Leye, Stefan, Dipl.-Ing.
Virtuell Interaktives Training
Fraunhofer IFF

Mecke, Rüdiger, Dr.-Ing.
Virtual Engineering
Fraunhofer IFF

Metzger, Thomas, Dr.
Institut für Verfahrenstechnik
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Möllers, Pierre, M.Sc.
Virtual Engineering
Fraunhofer IFF

Müller, Jörg, Dr.
Institut für Verfahrenstechnik
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Schneider, Steve, Dipl.-Inf.
Logistik- und Fabriksysteme
Fraunhofer IFF

Schotte, Eyck, Dr.
Institut für Verfahrenstechnik
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Sun, Yu, M.Sc.
Institut für Verfahrenstechnik
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Termath, Wilhelm, Dipl.-Päd.
Institut für Berufs- und Betriebspädagogik
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Tsotsas, Evangelos, Prof. Dr.
Institut für Verfahrenstechnik
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Winter, Marc, Dipl.-Ing.
Virtuell Interaktives Training
Fraunhofer IFF

Zug, Sebastian, Dr.
Institut für Verteilte Systeme
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

IMPRESSUM

13./14. Forschungskolloquium am Fraunhofer IFF
Forschung vernetzen – Innovationen beschleunigen
16. November 2012
Magdeburg

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF
Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr. h. c. mult. Michael Schenk
Sandtorstraße 22 | 39106 Magdeburg
Telefon +49 391 4090-0 | Telefax +49 391 4090-596
ideen@iff.fraunhofer.de
http://www.iff.fraunhofer.de

Umschlaggestaltung: Martin Stiller
Redaktion: Andreas Knittel M.A.
Fotos, Bilder, Grafiken: Soweit nicht anders angegeben,
liegen alle Rechte bei den Autoren der einzelnen Beiträge.

Herstellung:
docupoint GmbH

Bibliografische Information der Deutschen
Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.
ISSN 2191-8783

Alle Rechte vorbehalten
Für den Inhalt der Vorträge zeichnen die Autoren verantwortlich.
Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.
Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

© 01/2013 Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb
und -automatisierung IFF